

垂直管を流れる気液二相流の発生する音に関する研究

著者	小久保 幸介
学位名	修士（工学）
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2018
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001697/

修士学位論文

垂直管を流れる気液二相流の
発生する音に関する研究

平成 30 年度
(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

小久保 幸介

目次

1. 序論	…	1
1.1. 研究背景	…	1
1.2. 研究目的	…	2
1.3. 音について	…	3
2. 実験装置及び実験方法	…	4
2.1. 実験装置	…	4
2.1.1. テストセクション	…	5
2.1.2. 下部プレナム	…	6
2.1.3. 上部プレナム	…	6
2.1.4. 騒音計	…	7
2.2. 実験方法	…	8
3. 実験結果	…	9
3.1. 実験範囲	…	9
3.2. 可視化実験	…	12
3.2.1. 気泡流	…	13
3.2.2. スラグ流	…	14
3.2.3. チャーン流	…	15
3.2.4. 環状流	…	16
3.2.5. 判別結果	…	17
3.3. 空気流量と音の大きさ	…	19
3.4. FFT による周波数成分の解析	…	25
3.5. 変動音解析	…	39
4. 結論	…	63
謝辞	…	64
参考文献	…	65

記号表

A	管断面積	(m^2)
C	換算係数	
d	管内径	(m)
g_0	地上環境における重力加速度 (約 9.81)	(m/s^2)
g	重力加速度	(m/s^2)
j_i	見かけ速度	(m/s)
j_i^*	無次元見かけ速度	
P	圧力	(MPa)
P_i	瞬時音圧	(Pa)
P_{rms}	実効値音圧	(Pa)
Q	体積流量	(m^3/s)
Q'	計測流量	(m^3/s)
t	温度	($^{\circ}\text{C}$)
u	二相流速度	(m/s)
W	質量流量	(kg/s)
α	ボイド率	
ρ	密度	(kg/m^3)
σ	表面張力	(N/m)

下付き文字

d	設計値
G	空気 (標準状態, 0°C , 1atm)
g	空気 (実験装置入口条件)
L	水 (標準状態, 0°C , 1atm)
l	水 (実験装置入口条件)

1. 序論

1.1 研究背景

物質には通常、固体、液、気体の3つの状態（相）があり、2つまたは3つの相が混在あるいは共存している混合体の流れを、混相流と呼んでおり、このうち、気体と液体の混合体流れを気液二相流と呼ぶ^[1]。

気液二相流は、ボイラをはじめ、原子炉、冷凍機といった産業機器、プラント等でよく見られる現象である。そのため、これら機器の設計及び運転を行う上で、気液二相流の特性を明らかにすることは非常に重要である。日本では、1950年頃から工業の復興が始まり、発電設備容量の急激な上昇と1955年に日本原子力研究所の設立などによって、気液二相流の微細構造と熱伝達特性の知識が不可欠となり、気液二相流に関する研究が体系的に行われ、急速に発展した^[2]。

気液二相流の流動状態によって、二相流はその特性（圧力損失、振動、伝熱等）に変化がある。したがって、流動状態は基本的なパラメータと言えるが、量的に表示されていない。混相流の分野では、気液二相流の流動状態をいくつかの類型化された形態、流動様式と呼んで分類、整理している。流動様式ははじめ視察によって判断されてきた。そのため、主観が入り、他者に流況の実体が理解されない場合も起こった。気液二相流の場合には、特にこの傾向が顕著である。

その後、客観的に評価する必要性から流動様式のモデル化による研究が進められ、条件から流動様式を算出することが一般的となる。また、従来までに流動様式の判別法や遷移条件に関する研究について多くの研究者が取り組み、有意な手法や計算式が示されている^[3]。しかし、プラント等で運転中の流動様式はボイド率計測や差圧計測を元に識別するのが主流であり、計測の際に配管系に組み込まれる計測器が流体との接触により、流れ特性にも影響を及ぼす恐れがある。さらに内部の流動状態が不可視な管において、X線を利用した管内流動状態の可視化技術^[4]も存在し、非接触で計測できる等の利点はあるものの、設備が高価であり、実際にプラントで利用することは難しい。

1.2 研究目的

そこで本研究では、比較的安価に計測が可能であり流動様式の特性も含まれると思われる、気液二相流が放出する流動音に着目し、音波の解析から流動様式を推定する技術を検討している。熟練したエンジニアは聴音棒を使って機器からのノイズを聞くことにより内部を流れる流動様式を判断することが可能である。熟練した技術が必要である音による判別を、二相流が放出する音波を解析することにより、客観的な判断が可能となり技術の熟練が必要でなくなると考えている。流動音の収録は、騒音計により非接触な計測が可能である。

解析は物理的な観点と聴覚の特性を考慮した音質評価の観点から行った。流れの状態とそこから発せられる音波に関して、まず物理的特性を調べるために、音圧の実効値計算やFFTを用いて解析した。一方、熟練したエンジニアが聴覚を使い識別することを考慮し、心理音響技術を用いた音質評価である変動音解析による音質評価の手法も使用することとした。

先行研究において、テスト管は可視化での流動様式の見視判別等のためアクリル樹脂製の円管と、実際のプラント等では金属製のものが使用されることを考慮し、鉄鋼製の円管を使用した。その際、解析には1/3オクターブ解析を用いており、結果、アクリル管と鋼管で約1オクターブのズレが見られるのみであった。

そこで、本研究では新たに、より詳細な周波数解析や変動音解析を行い、流動様式による音の特徴を調査した。さらに、アクリル管、鋼管で得られた解析結果を用いて管壁材質による影響を検討した。

1.3 音について

音波とは、波を伝える媒質の振動が波の進行方向に伝わっていく縦波（疎密波）である。任意の計測点に伝わる音波は図 1.1 のように音圧の時間変動として収録される。

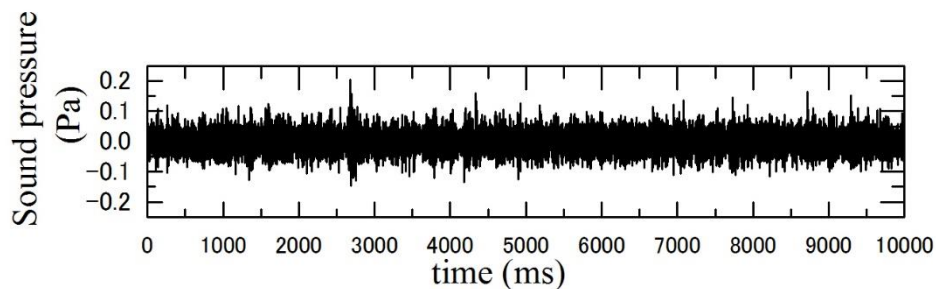


図 1.1 瞬時音圧の時間変化

人間が音を識別する場合、「音の大きさ」、「音の高さ」、「音色、音質」の三つの要素を聞き分けていると言われている^[4]。音波の物理的な特徴である振幅、周波数、波形といった要素が耳を介して、3つの識別要素に変換される。それらの関係を図 1.2 に示す。

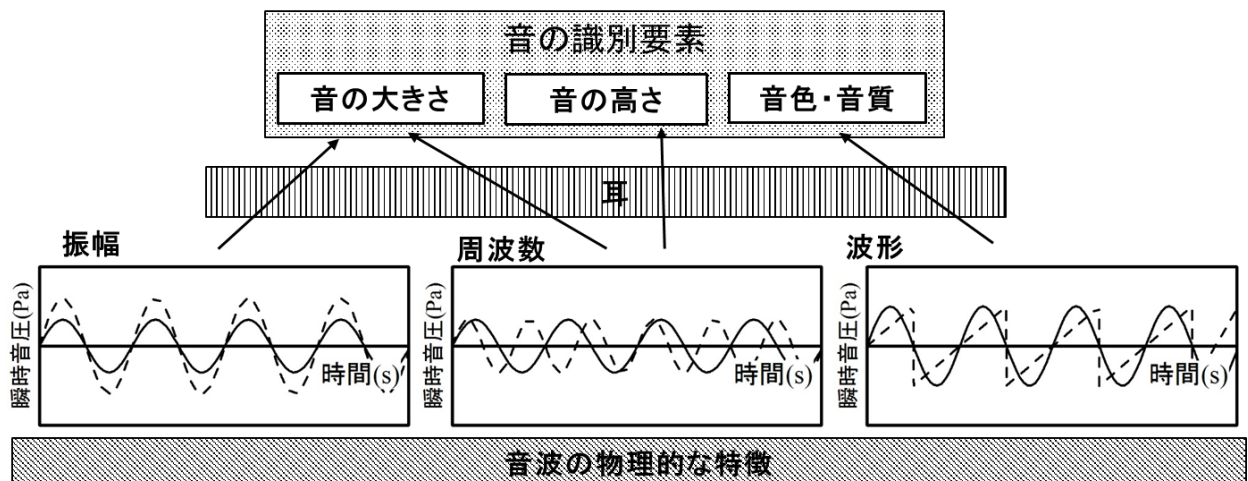


図 1.2 音の識別要素と音波の物理的な特徴の関係

私たちの耳は、音波の振幅が大きくなると音は大きく聞こえ、周波数が高くなると高い音に聞こえる。また、人の耳には周波数特性があり、周波数は音の大きさにも作用する。人間が感じることのできる可聴音は、音圧の範囲で $20\mu\text{Pa}$ から 20Pa 、周波数帯域はおよそ 20Hz から 20kHz と言われている。音色は波形の差異によるものと考えられているが、まだ十分には解明されていない。

本研究は、これらの音の特徴を掴むことが流動様式の判別に繋がると考えて行ったものである。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

音響計測に用いた実験装置の概要を図 2.1 に示す。試験は無響箱内部で行った。テスト管はアコー社製の無響箱（KM-1A）を貫通するように軸を鉛直方向に設置した。無響箱内部には流動音を収録する広帯域マイクロフォン（小野測器製：MI-1233），流動状態を録画する高速度ビデオカメラ（フォトロン社：FASTCAM-X128 PCI 4KC），光源（住田光学ガラス社製：LS-M210）を設置した。それぞれの機器から延びるコードは無響箱側部の開口から出し，外部機器と接続した。開口部には市販の防音材及びパテを詰め防音した。音の収録には小野測器製の精密騒音計（LA-5560）を使用した。音の解析には小野測器製の Oscope2 を使用している。

使用流体は空気と水道水であり，下部プレナムにて焼結金属を介して混合を行い，二相流を形成してテスト管に供給している。流れの向きは下方から上方へ流れる上向きの上昇流とした。テスト管を流れた二相流は上部プレナムにて，空気は大気中へ，水はドレンとして排出した。

下部プレナムへ供給する水道水はストレーナーを通し，流量に応じて 3 種の流量計を使い分け，ニードル弁にて流量の調整を行い，下部プレナム下方から供給した。供給する空気は圧縮空気槽から圧力調整弁にて一定圧力に減圧し，流量に応じて 4 種の流量計を使い分け，ニードル弁にて流量の調整を行い，下部プレナム側部から供給した。

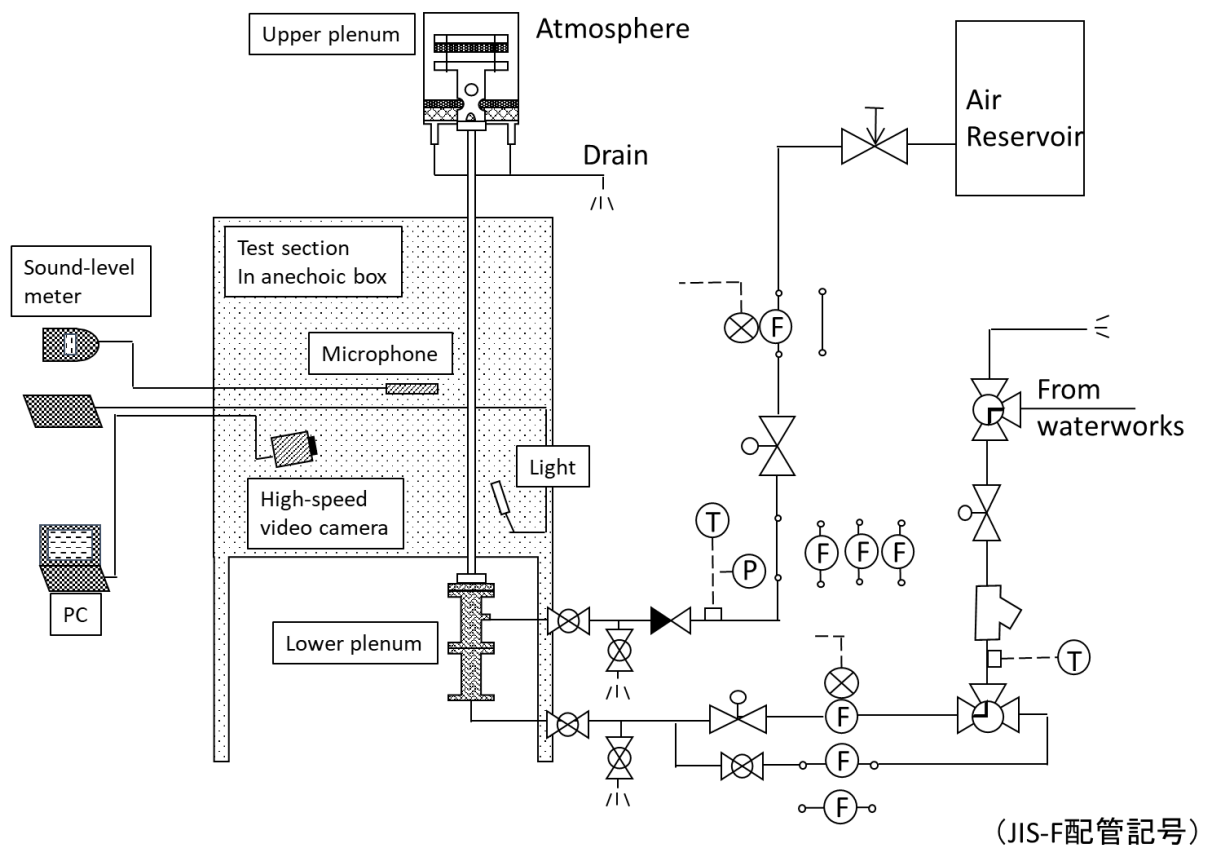


図 2.1 実験装置概要

2.1.1 テストセクション

先行研究において、テスト管は内部の流動様式等を確認するため、アクリル樹脂製円筒型直管を使用した。その内径 d 及び厚さ t は $d = 12\text{mm}$, $t = 3\text{mm}$ である。また、新しく管材質の影響を調べるために鉄鋼製円筒型直管 $d=11.7\text{mm}$, $t=2.8\text{mm}$ のものを使用した。テスト管全長はどちらも 1580mm である。

マイクロフォンの取り付け位置はテスト管から 30mm の位置とし、設置高さは無響箱の中央とした。これは下部プレナム出口から 770mm の位置にあたる (図 2.2)。

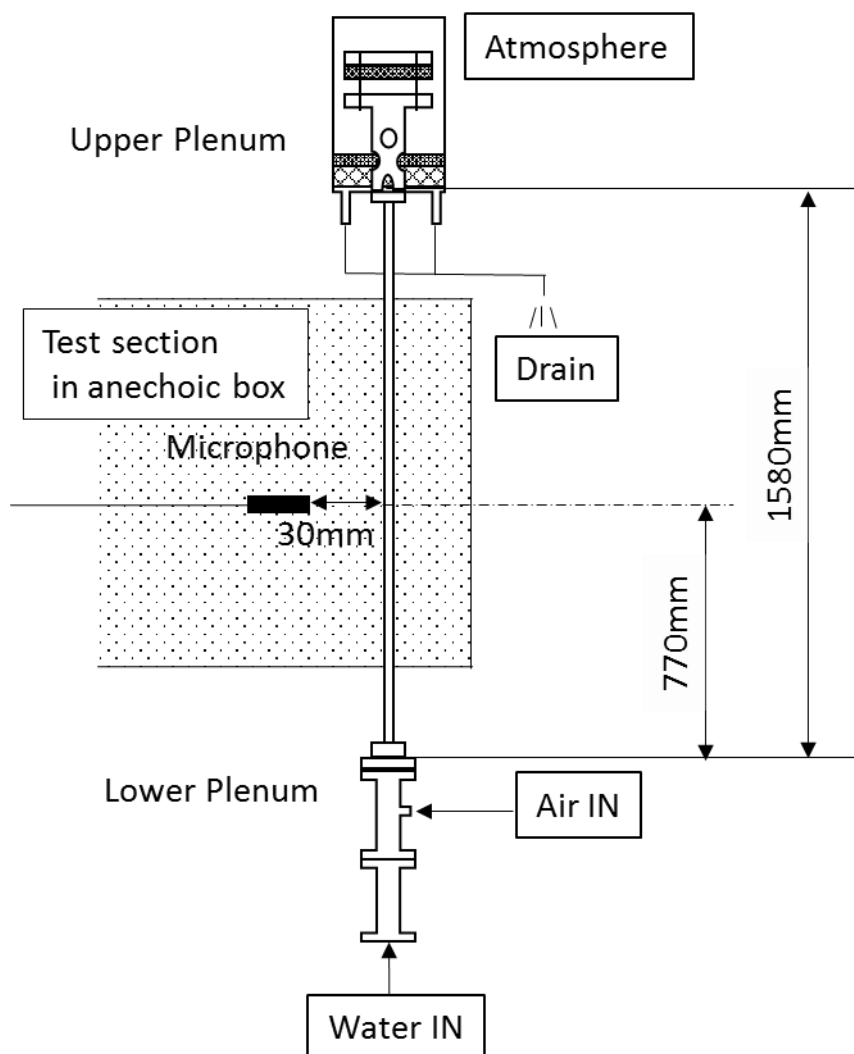


図 2.2 テストセクション

2.1.2 下部プレナム

下部プレナムはステンレス鋼を加工し、給水タンク部と空気－水混合部を有する構造となっている。プレナム下方から供給された水は給水タンクを満たし、混合部へと流れる。混合部には水の流れと同軸上に粗さ $20\mu\text{m}$ の円筒形焼結金属を設置してある（図 2.3）。焼結金属の寸法は、外径 $D = 40\text{mm}$ 、厚さ $t = 2\text{mm}$ 、長さ $l = 100\text{mm}$ である。空気は焼結金属の周方向から供給され、水に混合される。下部プレナム出口径はテスト管径より少し小さい $d = 11.5\text{mm}$ である（図 2.4）。



図 2.3 焼結金属

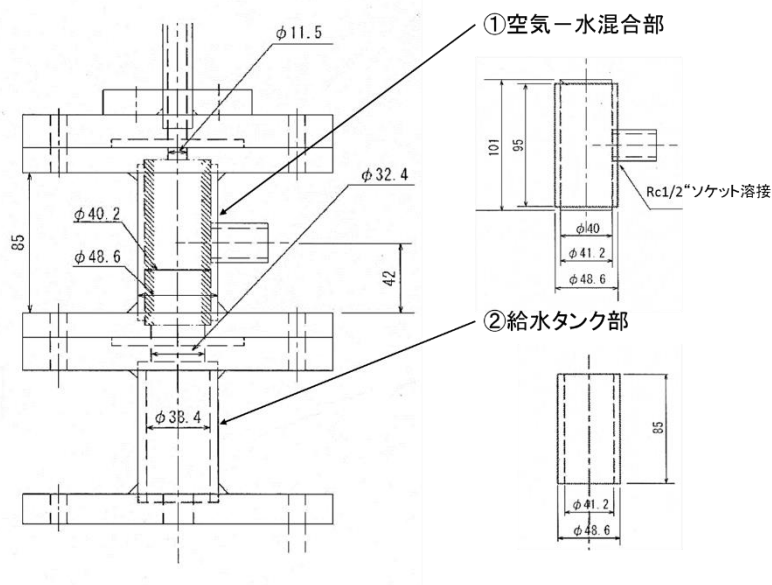


図 2.4 下部プレナム構造

2.1.3 上部プレナム

上部プレナムの構造を図 2.5 に示す。上部プレナムはアクリル材により構成されている。テスト管出口端部は上部プレナム底面より 40mm 高い位置にし、上部プレナムから出た水がテスト管内へ逆流するのを防止した。また、テスト管出口端部から 190mm 離れた位置に衝突版を設置し、水が外部へ吹き出すのを防止した構造となっている。

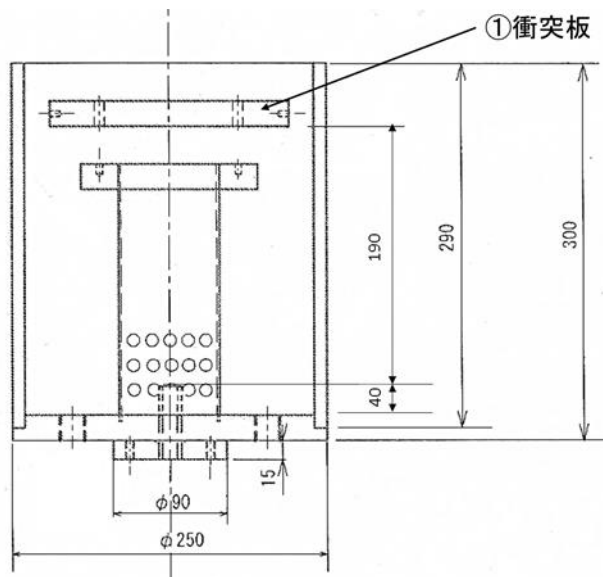


図 2.5 上部プレナム

2.1.4 騒音計

本研究で用いた騒音計は図 2.6 に示す。

精密騒音計 LA-5560

使用周波数範囲 20～12500Hz

騒音レベルの計測範囲 28～130dB

製造会社 株式会社小野測器



図 2.6 精密騒音計（小野測器製，LA5560）

2.2 実験方法

音響計測の手順を以下に示す．

- (1) 空気系統を閉じた状態で空気圧縮機を始動し，圧縮空気槽に圧縮空気を貯める．
- (2) 実験装置内に水を流し，テストセクションや下部プレナム内の空気抜きを行う．
- (3) 水漏れがないか，上部プレナムドレンラインから水が排出されているかを確認する．
- (4) 圧力調整弁にて空気圧力を（0.2～0.4MPaG）に設定し，テストセクション内に空気を流す．
- (5) 空気系統に漏れがないか確認する．
- (6) 水，空気流量を実験流量に調整する．
- (7) 上部プレナムにて逆流が起きていないか確認する．
- (8) 大気圧，大気温度の測定を行う．
- (9) 流動の状態や流動音を確認した後，無響箱扉を閉める．
- (10) ハイスピードカメラで流れの撮影を行う．
- (11) 流れの状態（流量，温度，圧力）を記録する．
- (12) 騒音計を用いて流動音を収録する．

同設定流量に対し，アクリル管では映像の記録を 1 回，流動音の収録を 3 回，鋼管では流動音の収録のみを 3 回行っている．映像ははじめ 500fps で 10 秒間記録を行っていたが，詳細な流動の確認が難しかったため，4000fps で 1 秒間記録に変更した．音の収録は手順（11），（12）を繰り返し 3 回行い，サンプリング周波数は 64kHz，収録時間は 10 秒間行った．

流量計の切り替えを行う際には，装置内の流体を止めてから交換する．切り替えた後は水，空気ともに漏れがないが必ず確認する．流量を変えた場合は，定常状態になるまで少し待ち，流量計の数値を確認してから計測を行う．

3. 実験結果

3.1 実験範囲

実験範囲を決めるにあたり流量設定値は流量計の目盛りを目安に行った．流量の設定値および使用した流量計の流量範囲を表 3.1 に示す．

表 3.1 使用流量計と計測設定流量

水			空気			
流量計	流量範囲 (L/min)	設定値	流量計	流量範囲 (L/min)	設定値	
面積流量計	0.1～1	0.5	面積流量計	0.5～5	1	
		1			2	
	0.5～5	2			3	
		5			4	
渦式フローセンサ	4～40	10			1～10	5
				6		
				7		
				10		
				10～100		15
					20	
					30	
					50	
					70	
					100	
			サーマルマス フロー メーター		0～500	150
						200
				250		

ここで面積流量計はその原理上，運転条件がその流量計の設計条件と異なる場合指示誤差を発生する．指示誤差は以下の計算により補正できる．

液体測定の場合，測定液体の密度が設計条件と異なるとき指示誤差を発生する．真流量は指示流量に換算係数を乗じることで求まり，密度換算係数 C_γ は式 (3.1) で計算される．

$$C_\gamma = \sqrt{\{\gamma_d(\gamma_f - \gamma)\} / \{\gamma(\gamma_f - \gamma_d)\}} \quad (3.1)$$

ここで γ_d は設計密度 (g/cm^3)， γ は測定液体密度 (g/cm^3)， γ_f はフロート部密度 (g/cm^3) である．本実験の流量計の設計液体是水であり，測定液体も水であることから密度の差分はなく， $C_\gamma = 1$ として計算を行った．

気体測定の場合も同様に，測定気体の密度，運転圧力及び運転温度が設計条件と異なるとき指示誤差を発生する．真流量は指示流量に換算係数を乗じることで求まり，換算係数は密度換算係数 C_γ ，圧力換算係数 C_p ，温度換算係数 C_t の積である．それぞれの換算係数は式 (3.2)，(3.3)，(3.4) で計算される．

$$C_\gamma = \sqrt{\gamma_d/\gamma} \quad (3.2)$$

$$C_p = \sqrt{(p + 0.1013)/(p_d + 0.1013)} \quad (3.3)$$

$$C_t = \sqrt{(t_d + 273)/(t + 273)} \quad (3.4)$$

ここで γ_d は標準状態下での設計気体の密度 (kg/m^3) であり， γ は標準状態下での測定気体の密度 (kg/m^3) である．本実験の流量計の設計液体は空気であり，測定液体も空気であることから $C_\gamma = 1$ となる．また p_d は設計圧力 (MPa)， t_d は設計温度 ($^\circ\text{C}$) であり，それぞれの流量計の設計値は表 3.2 の通りである． p は運転時のゲージ圧力 (MPa)， t は運転温度 ($^\circ\text{C}$) である．

表 3.2 流量計の設計圧力と設計温度

流量範囲 (NL/min)	設計圧力	設計温度 ($^\circ\text{C}$)
0.5~5	0.5 (kg/cm^2)	25
1~10	0.05 (MPa)	25
10~100	0.05 (MPa)	25

実験条件の整理において，気液二相流各相の実流速を求めることは困難であることから，見かけ速度により整理を行った．前述の補正係数より標準状態下における液相の真流量 Q_L (m^3/s)，気相の真流量 Q_G (m^3/s) は計測流量 Q_L' (L/min)， Q_G' (NL/min) を用い，式 (3.5)，(3.6) で表される．

$$Q_L = \frac{Q_L'}{1000 \times 60} \quad (3.5)$$

$$Q_G = \frac{Q_G' \times C_p \times C_t}{1000 \times 60} \quad (3.6)$$

実験条件下における液相の体積流量 Q_l (m^3/s)，気相の体積流量 Q_g (m^3/s) は標準状態下における各相の密度 $\rho_L = 1000$ (kg/m^3)， $\rho_G = 1.293$ (kg/m^3) 及び実験条件下における各相の密度 ρ_l (kg/m^3)， ρ_g (kg/m^3) を用い，式 (3.7)，(3.8) のように求まる．

$$Q_l = \frac{Q_L \times \rho_L}{\rho_l} = \frac{Q_L \times 1000}{\rho_l} \quad (3.7)$$

$$Q_g = \frac{Q_G \times \rho_G}{\rho_g} = \frac{Q_G \times 1.293}{\rho_g} \quad (3.8)$$

よって各相の見かけ速度 j_l (m/s)， j_g (m/s) は，テスト管断面積を A (m^2) とすると，式 (3.9)，(3.10) となる．

$$j_l = \frac{Q_l}{A} = \frac{Q_L \times 1000}{A \times \rho_l} \quad (3.9)$$

$$j_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{Q_G \times 1.293}{A \times \rho_g} \quad (3.10)$$

図 3.1 はアクリル管において、式 (3.11) の無次元化の式を用いそれぞれの実験条件を整理したものである。図中に示す線は本実験装置において水管ラインのバルブを全開にし、空気流量を増加させた場合の水流量の変化であり、本実験での計測流量限界を示している。また、実験における空気流量は実験装置の安全を考慮して $j_g^* = 3$ 程度を目安とした。

$$j_i^* = \frac{\rho_i^{\frac{1}{2}} \times j_i}{[g_0 d (\rho_l - \rho_g)]^{\frac{1}{2}}} \quad (i = l \text{ or } g) \quad (3.11)$$

ここで g_0 は地上環境における重力加速度を表す。

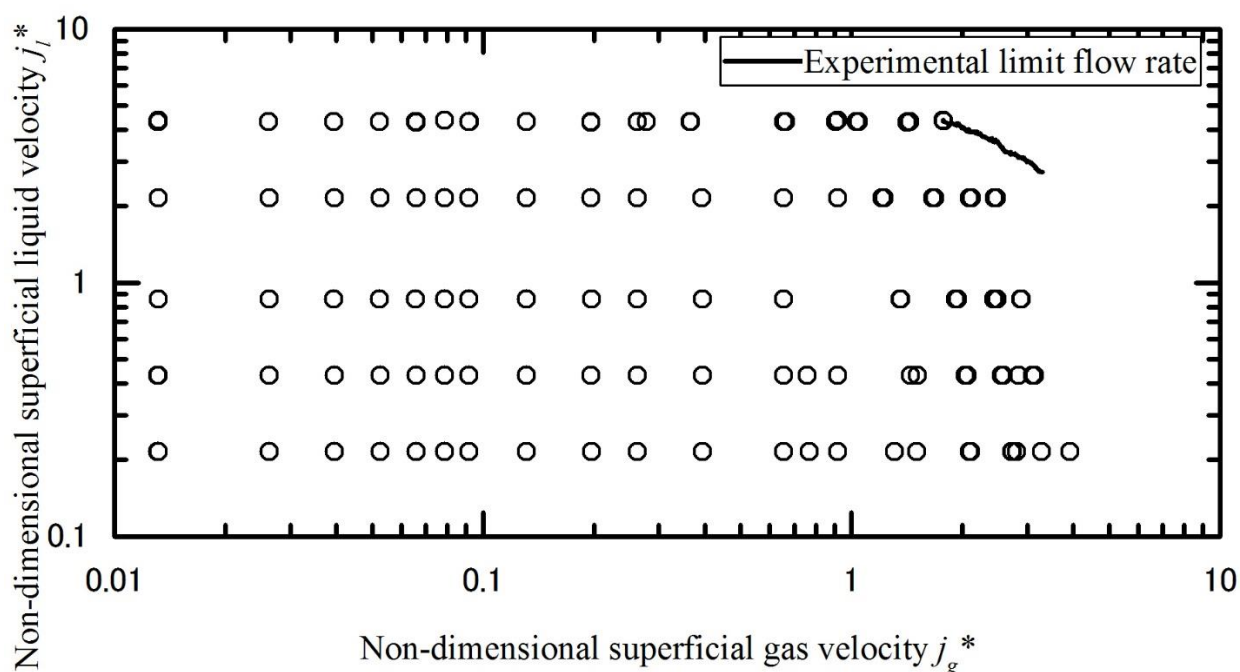


図 3.1 実験範囲と実験限界流量

3.2 可視化実験

本実験で観察された流動を高速度ビデオカメラの映像を元に様式毎に分類した。はじめに一般的な流動様式の分類に関して簡単に整理する。流動様式は管の方向（鉛直または水平）や、流れの方向（上向きまたは下向き）により分類が異なる。本実験系統である垂直上昇流に関する流動様式の定義を『気液二相流技術ハンドブック』から抜粋し、表 3.3、図.3.2 に示す。場合によりこれはもっと細分類される。

表 3.3 垂直上昇流における流動様式の定義^[5]

(a). 気泡流 (Bubbly Flow)	連続した液相中に小気泡が分散した流れ。
(b). スラグ流 (Slug Flow)	管路断面を満たすような大きい特徴的な砲弾形の気泡と小気泡を含む液体部分が交互に存在する流れ。
(c). チャーン流 (Churn Flow)	液相流量が大きい場合は液体スラグ中に多数の気泡を含んだ状態になる。この状態をチャーン流、フロス流またはセミアニユラ流と呼ぶ。管径の大きい時は液体の上下する振動を伴う。
(d). 環状流 (Annular Flow)	気相流量が増すと、管壁に液膜が存在し、気相の管断面中心部（コア部という）には多数の液滴を同伴している流れ。また気相コア部に液滴の集塊状のものを含むこともある。

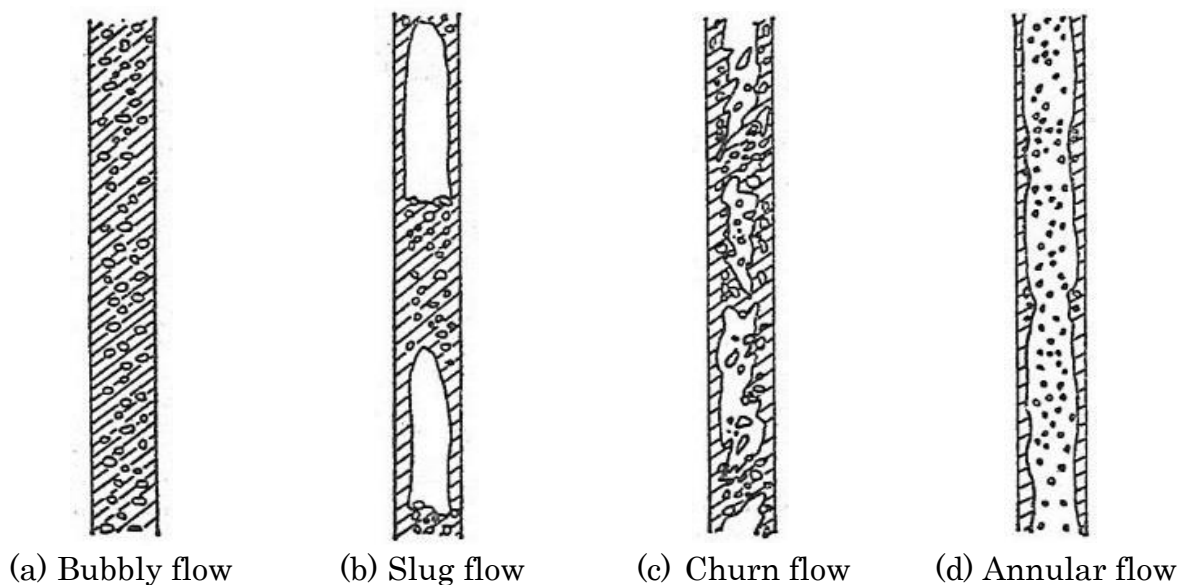


図 3.2 垂直上昇流における流動様式^[5]

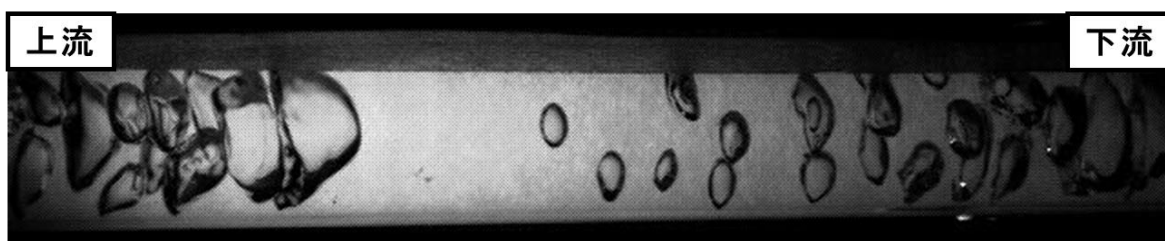
これらを参考に流動様式の分類を行った。

3.2.1 気泡流

実験で観測された気泡流の例を図に示す． $j_1^* = 0.215$ のデータでは気泡流は観測できなかった．水低流量において気泡は大きな気泡が上昇する傾向がみられた（図 3.3）．また気泡が密に集まっている部分と気泡のない疎の部分交互に流れる傾向が見られた．水高流量の場合，径の小さな気泡が無数に上昇する傾向がみられた（図 3.4）．

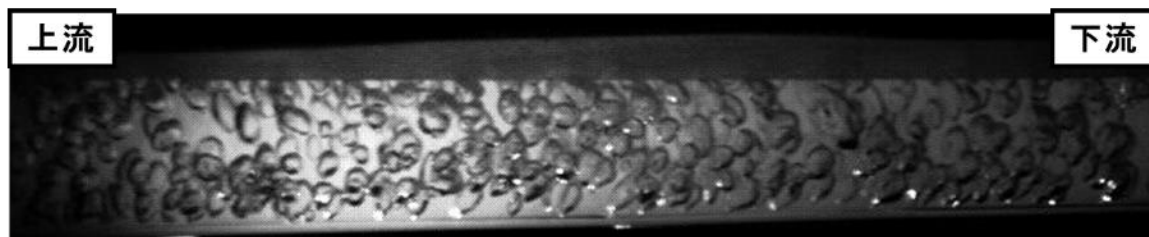


t = 250ms

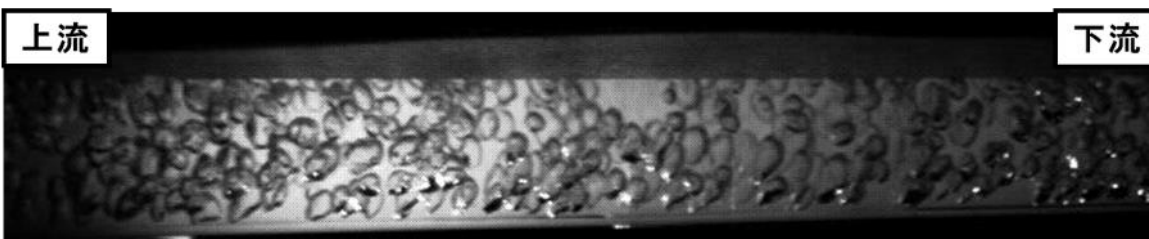


t = 750ms

図 3.3 気泡流（ $j_1^* = 0.861$, $j_g^* = 0.013$ ）



t = 250ms

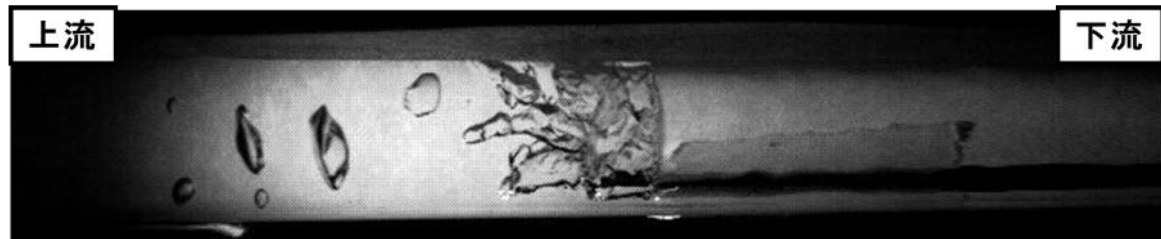


t = 750ms

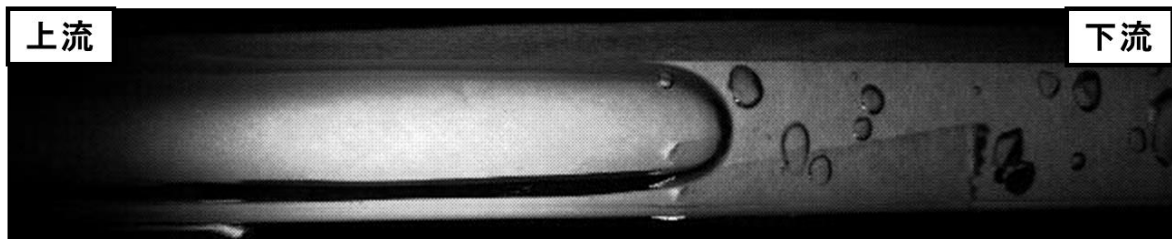
図 3.4 気泡流（ $j_1^* = 4.3$, $j_g^* = 0.039$ ）

3.2.2 スラグ流

実験で観測されたスラグ流の例を図に示す．ほとんどの流量において，流路断面をほぼ満たし，周囲に液膜のある砲弾形の気泡と液相中に小気泡を含む液スラグが交互に存在する流れが観察された（図 3.5）．水低流量において，空気流量が多くなるにつれ砲弾形状の気泡長さが長くなり，砲弾下部では周囲の液膜が逆流し，液スラグ部へ複雑な流れを生む傾向がみられた．また砲弾上部などで境界が不安定になる様子も観測された．水高流量の場合，砲弾形の気泡周囲の液膜中にも径の小さな気泡が無数に観測された．（図 3.6）．

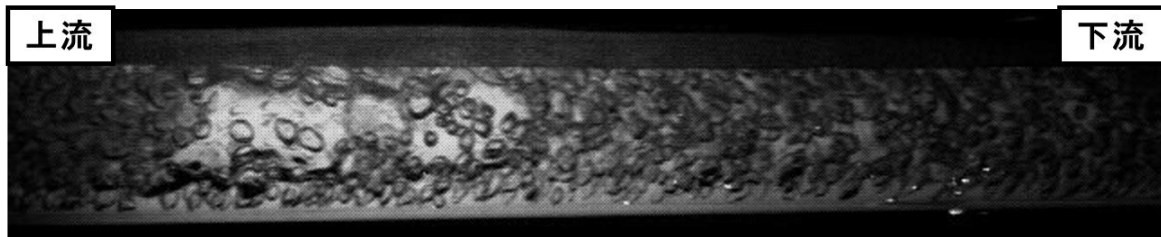


$t = 250\text{ms}$

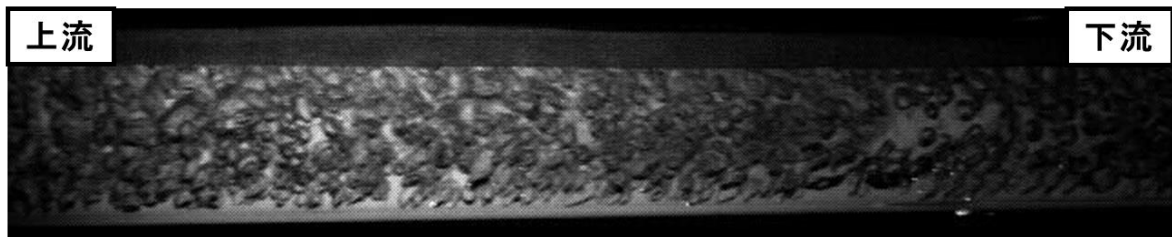


$t = 750\text{ms}$

図 3.5 スラグ流（ $j_1^* = 0.431$, $j_g^* = 0.053$ ）



$t = 260\text{ms}$

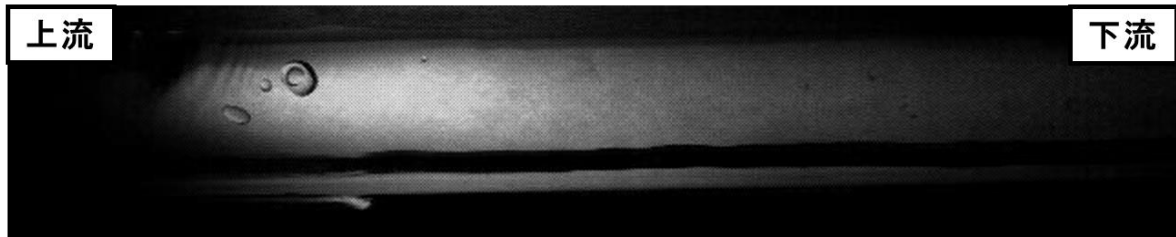


$t = 750\text{ms}$

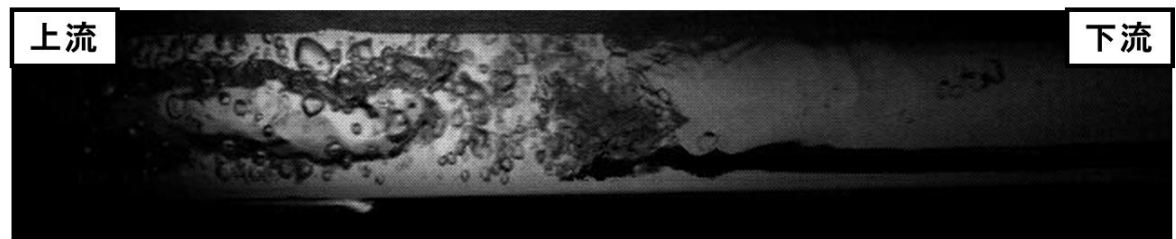
図 3.6 スラグ流（ $j_1^* = 4.3$, $j_g^* = 0.092$ ）

3.2.3 チャーン流

実験で観測されたチャーン流の例を図に示す．大気泡部（気柱）と液体スラグの境界面に歪みが生じ、砲弾形状の気泡が観測できなくなった．気柱周囲の液膜内に気泡の存在が認められた．気泡の量は水流量が大きいほど多く、気泡径は界面乱れに依存し、空気流量が大きい程小さくなるようにみられる．また気柱上部、下部のみならず中部においても気柱の揺らぎが観測できた．水低流量（図 3.7）において、気柱周囲の気泡が気柱に取り込まれていく様子が観察された．気柱下部では周囲の液膜が逆流している傾向がみられた．水高流量（図 3.8）の場合、気柱の乱れが大きくなり、その長さは短くなった．

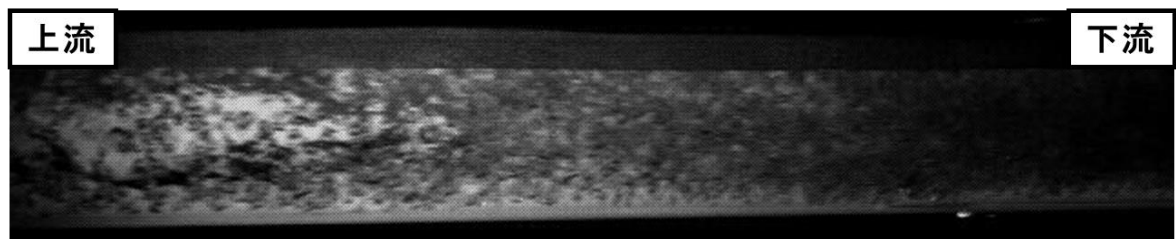


t = 185ms

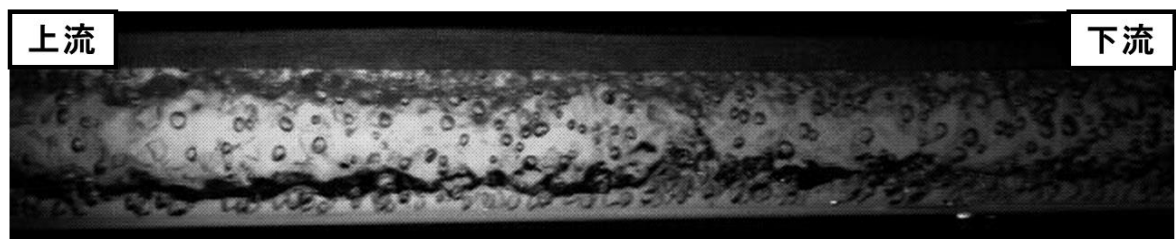


t = 750ms

図 3.7 チャーン流（ $j_l^* = 0.431$, $j_g^* = 0.197$ ）



t = 250ms

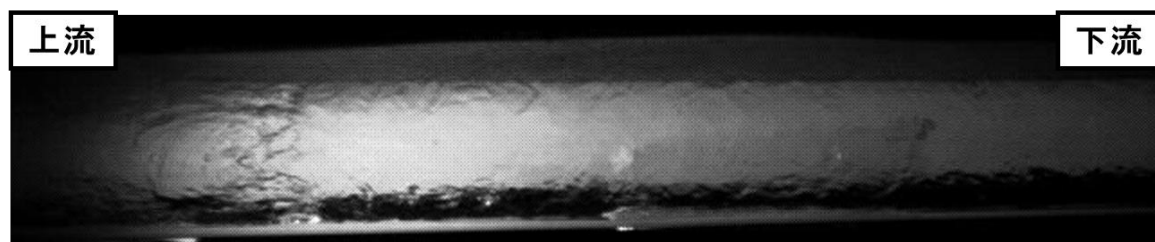


t = 750ms

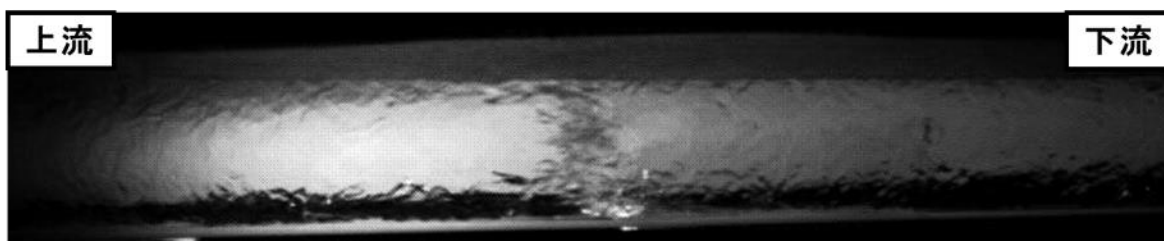
図 3.8 チャーン流（ $j_l^* = 4.3$, $j_g^* = 0.262$ ）

3.2.4 環状流

実験で観測された環状流の例を図に示す． $j_l^* = 4.31$ のデータでは環状流は観測できなかった．液相が壁面に押し付けられ環状液膜として流れ，気相が管中心部連続して流れており，液滴と思われる影が中心気相内部を流れる現象が観測されたものをここに分類している．水低流量において空気流量が少ない場合，液膜が安定し，液滴が中心気相を流れる状態が見られた（図 3.9）．水高流量（図 3.10）の場合，液膜内に気泡が含まれており，時折画面全体が気泡で埋め尽くされる状態も見られた．

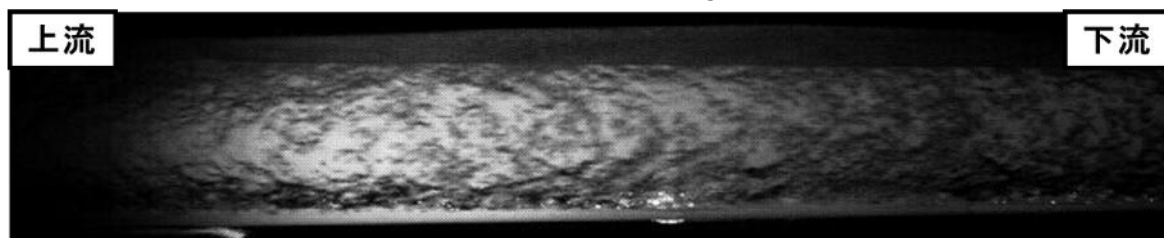


$t = 250\text{ms}$

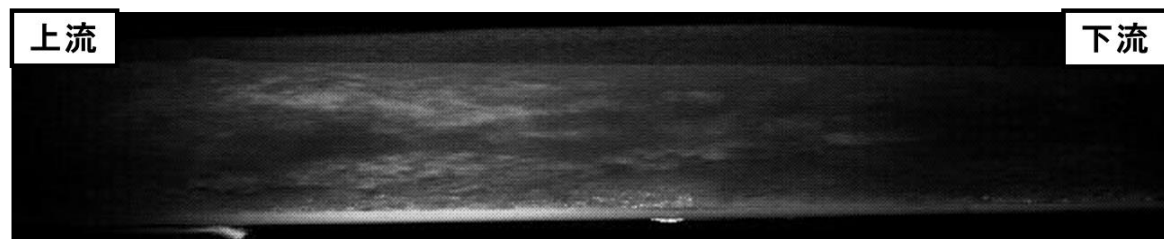


$t = 760\text{ms}$

図 3.9 環状流（ $j_l^* = 0.215$, $j_g^* = 3.28$ ）



$t = 250\text{ms}$



$t = 770\text{ms}$

図 3.10 環状流（ $j_l^* = 2.153$, $j_g^* = 2.094$ ）

3.2.5 判別結果

アクリル管における流動様式の見視判別を行った結果を図 3.11 に示す。図中の丸いプロットが気泡流，三角のプロットがスラグ流，四角いプロットがチャーン流，星形のプロットが環状流を示している。また図中の線は Govier による slug 遷移線（式 3.12），Golan and Stenning による Churn 遷移線（式 3.13）及び Osakabe らによる環状流遷移線（式 3.16）である。式 3.12，3.13 は式 3.11 を用いて無次元化を行い，それぞれ式（3.14），（3.15）としている。式中の密度 ρ_l ， ρ_g は実験条件に近い大気圧下，20℃における密度を代入した。

また，図 3.12 に本実験にて行ったアクリル管と鋼管における流動様式線図と実験測定条件の比較を示す。

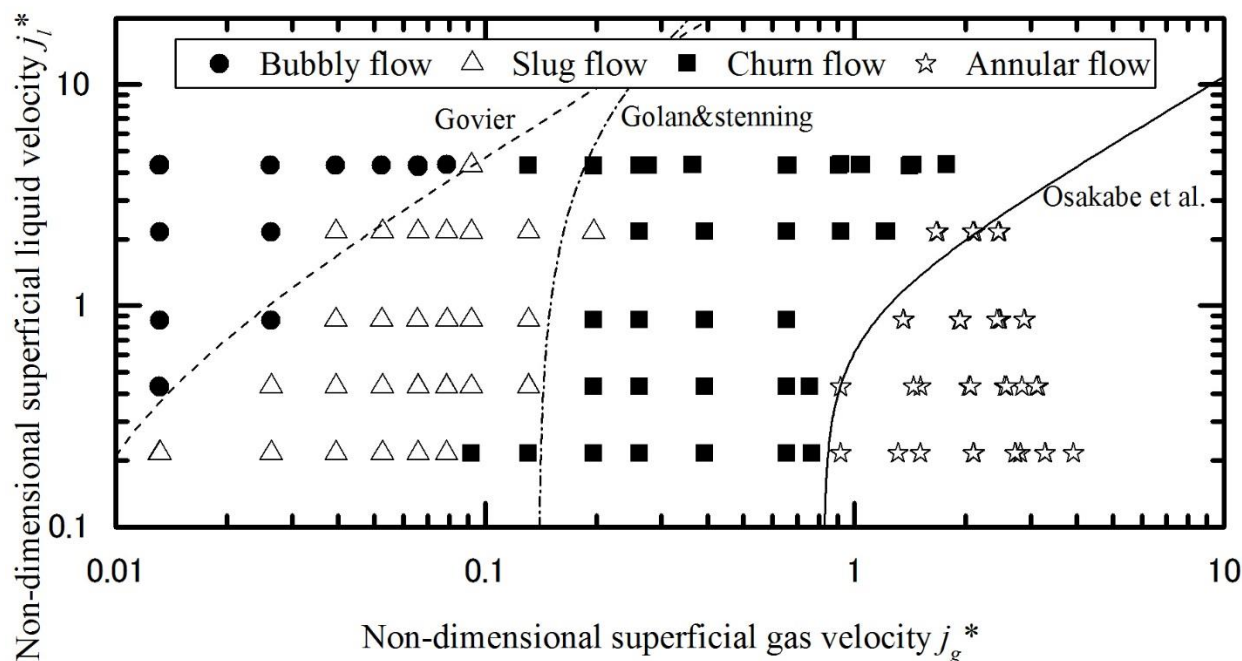


図 3.11 目視による流動様式判別結果（アクリル管）

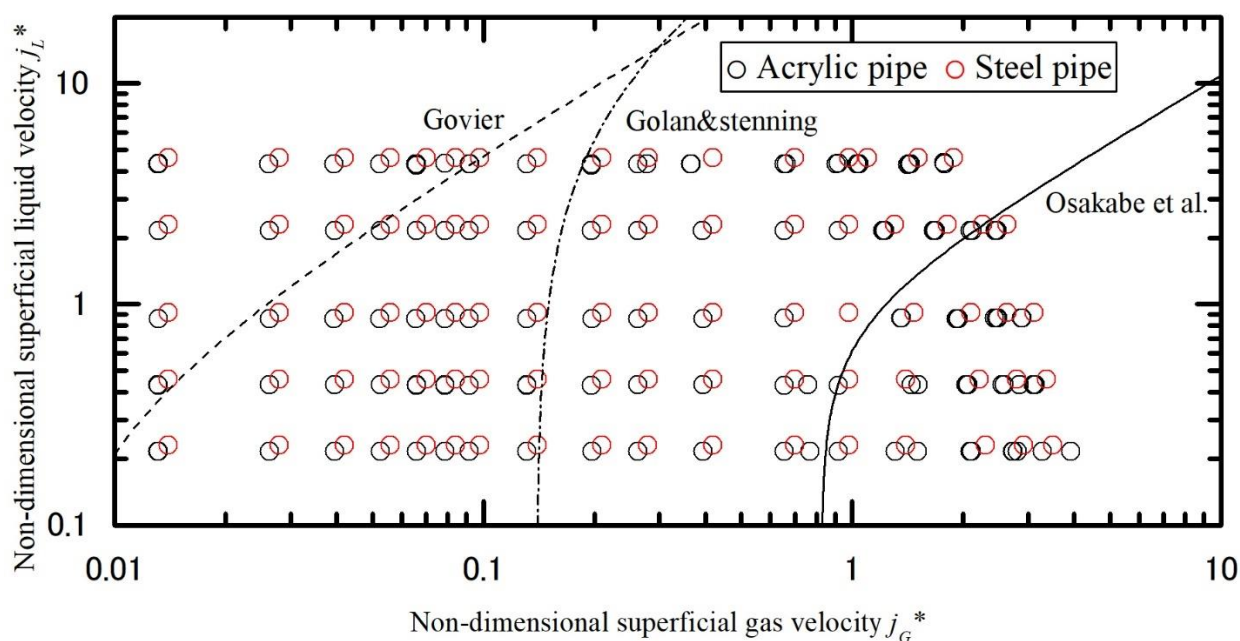


図 3.12 鋼管とアクリル管での測定条件

$$j_g = 0.56j_l + 0.16 \left[\frac{gD(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{0.5} \quad (3.12)$$

$$j_g = 0.139 \left[gD \frac{\rho_l}{\rho_g} \right]^{0.5} + 0.11 \left[\frac{\rho_l}{\rho_g} \right]^{0.5} j_l \quad (3.13)$$

$$j_g^* = 0.56 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l} j_l^*} + 0.16 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (3.14)$$

$$j_g^* = 0.139 \sqrt{\frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_g)}} + 0.011 j_l^* \quad (3.15)$$

$$j_g^* = 0.412 \left[4 \frac{g}{g_0} + 5(j_l^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

また本研究では、流動様式を考慮してボイド率 α を算出した。ただし、気泡流に関しては均質流とみなし、式 (3.17) の計算を行った。スラグ流、チャーン流についてはスリップを考慮し、Zuber-Findlay のドリフトフラックスモデルを使い、式 (3.18) によりボイド率を算出した。環状流についてはせん断力より式 (3.19) からボイド率を求めている。

$$u_g = \frac{Q_g}{A_g} = \frac{Q_g}{\alpha A} = \frac{j_g}{\alpha} \quad (3.17)$$

$$\alpha = \frac{j_g}{1.13(j_l + j_g) + 1.18 \left[\frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)g}{\rho_l^2} \right]^{\frac{1}{4}}} \quad (3.18)$$

$$j_g = \left[\frac{5}{\alpha^2} \frac{0.25D(1 - \alpha)^3(\rho_l - \rho_g)g + 0.0025\rho_l j_l^2}{(1 - \alpha)^2 0.0025\{1 + 150(1 - \sqrt{\alpha})\}\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.19)$$

3.3 空気流量と音の大きさ

物理的に音の大きさを捉える場合、音は伝わる媒質の圧力の変化として表され、この波形の振幅（瞬時音圧の時間変化の実効値）が音の大きさに相当する．式（3.20）にこの実効値 P_{rms} （Pa）の計算式を示す．物理量として音のパワーなどを扱う場合も同様に音は圧力として取り扱われる．

$$P_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (P_i)^2} \quad (3.20)$$

ここで P_i は瞬時音圧（Pa）、 N はデータ数である．

鋼管において水流量を一定とし、空気流量を増やしていき、それに伴う流動様式の変化と音圧の変化を調べた．図 3.13 は $j_l^* = 0.229$ において、 j_g^* を増加させていったときのグラフを示している．図中のプロットの形は図 3.12 より、遷移式で判別した流動様式を示している．

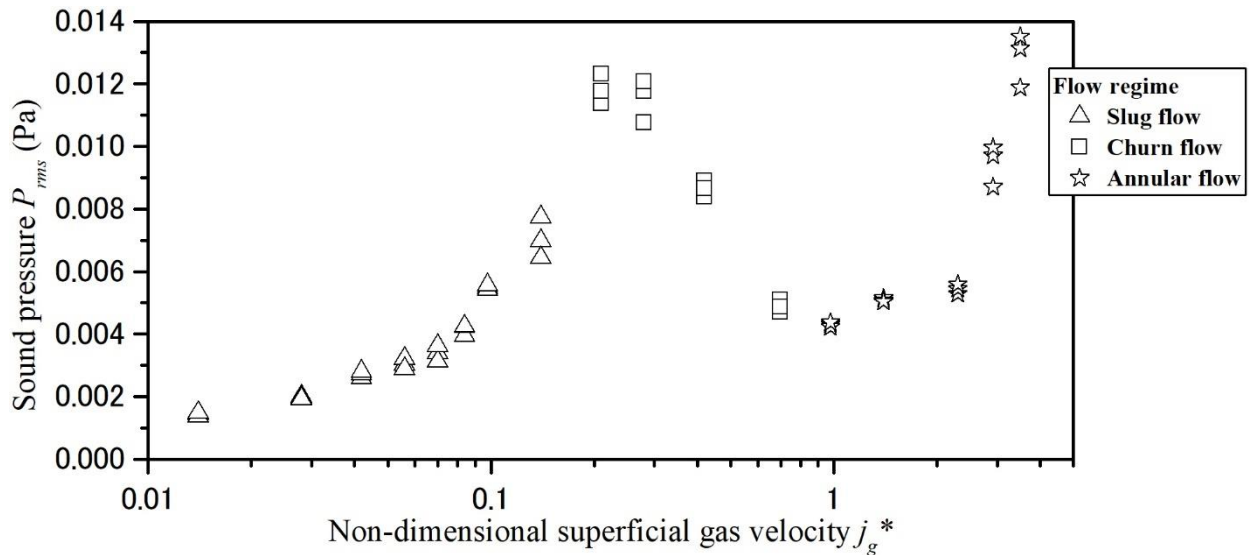


図 3.13 鋼管における無次元空気見かけ速度と音圧 ($j_l^* = 0.229$)

$j_g^* = 0.21$ まで空気流量の増加に伴って音圧が増加する． $j_g^* = 0.21$ の時、音圧の値はおよそ 0.011(Pa)である．さらに $j_g^* = 0.21$ から $j_g^* = 0.98$ までは空気流量の増加に伴って音圧は減少し、もっとも小さい音圧は 0.0043Pa となっている．さらに空気流量を増加させると音圧は再上昇し、空気流量最大時である $j_g^* = 3.5$ の時には、音圧は 0.013Pa と、大きな値をとる．これらの音圧の変化の傾向は流動様式の変化によって、音の発生に変化が現れたためだと思われる．

$j_g^* = 0.14$ までの範囲はスラグ流であり、空気流量の増加と共に音圧が上昇する． $j_g^* = 0.21$ では流動様式がチャーン流となり、音圧は減少する傾向となる．このチャーン流における音圧のピーク時のボイド率はドリフトフラックスモデルでの計算より、 $\alpha = 0.79$ であった．しかし、本実験では空気流量は段階的に増加をさせたため、今回のピークが無段階に空気流量を増加させた場合にとるピークの値と必ずしも一致するとは言えない．そこで、ピークの前後の値も考慮すると、音圧の低下はおよそ $\alpha = 0.74 \sim 0.81$ で起きると予測できる．また、 $j_g^* = 0.98$ 以降では音圧の再上昇が見られた．この時、流動様式はチャーン流から環状流へと遷移している．

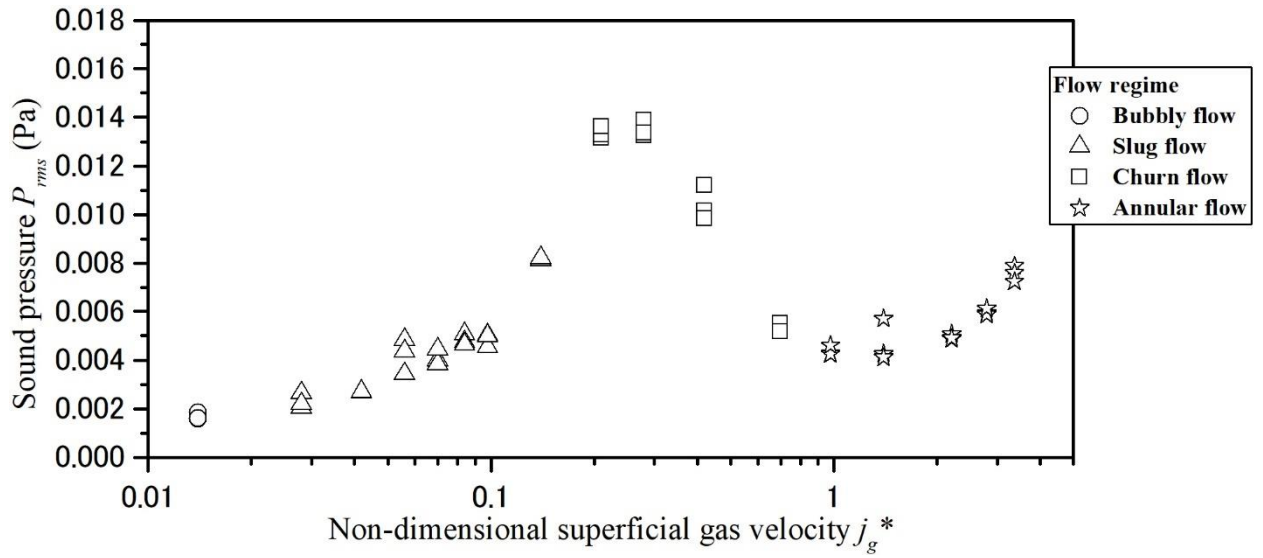


図 3.14 鋼管における無次元空気見かけ速度と音圧 ($j_l^* = 0.457$)

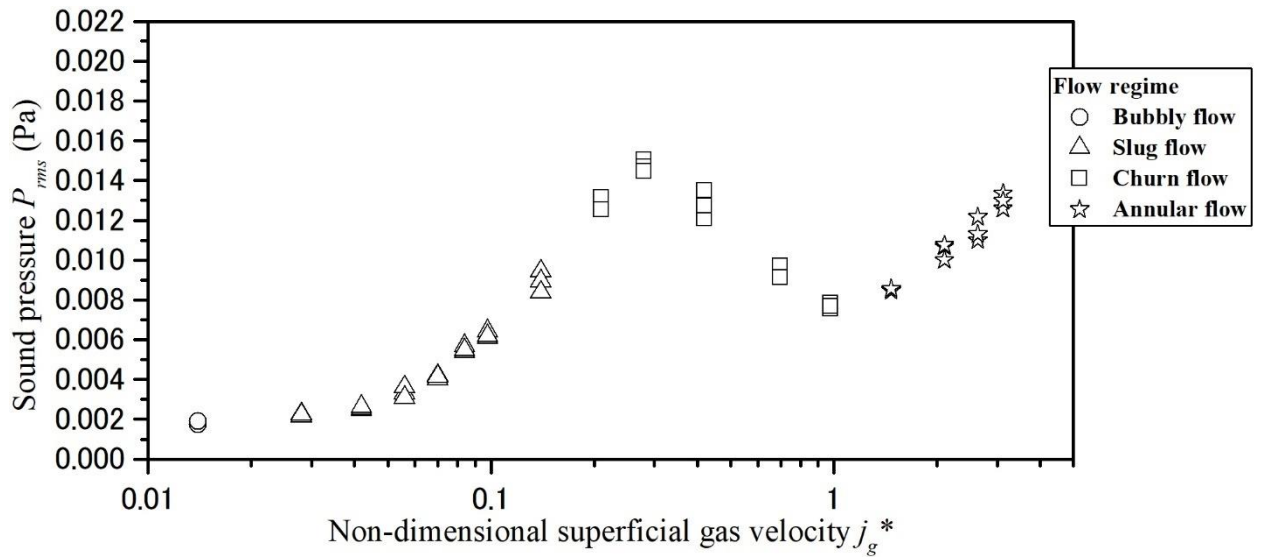


図 3.15 鋼管における無次元空気見かけ速度と音圧 ($j_l^* = 0.918$)

これらの傾向は、 $j_l^* = 0.457$ $j_l^* = 0.918$ においても同様に観察されたが、チャーン流において一度増加した後に減少傾向が見られるようになった（図 3.14, 3.15）。その時の音圧のピークの無次元みかけ空気流速はどちらも、およそ $j_g^* = 0.280$ である。またピークが現れると予測されるボイド率の値はそれぞれ $\alpha = 0.76 \sim 0.82$ $\alpha = 0.69 \sim 0.78$ となった。前述の結果と合わせて考えるとチャーン流領域において、ボイド率が $\alpha = 0.76 \sim 0.78$ で音圧はピークをとると予測される。

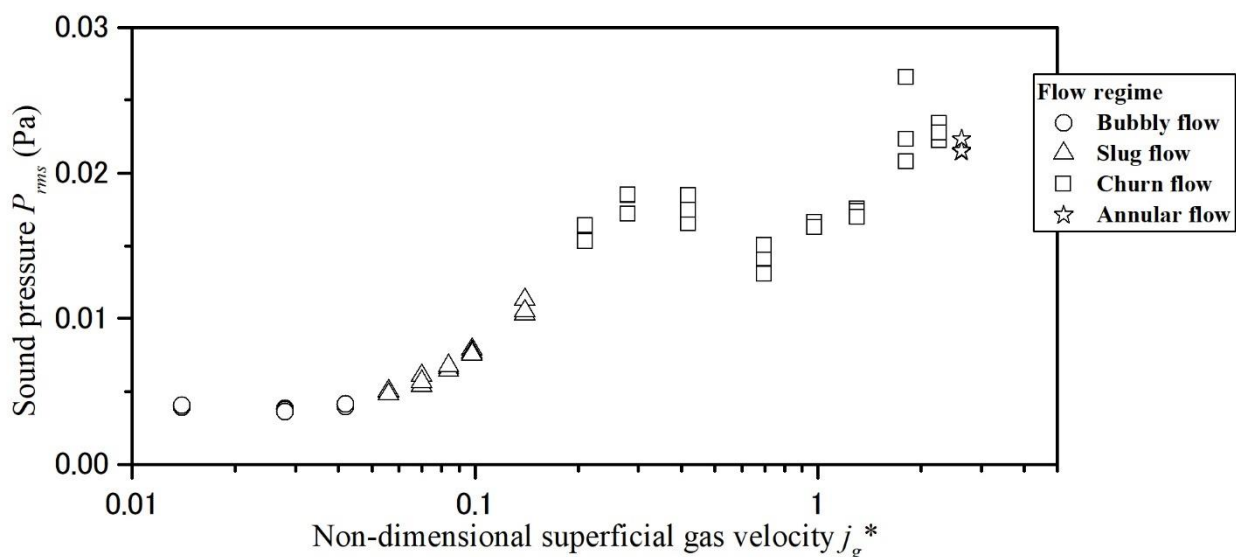


図 3.16 鋼管における無次元空気見かけ速度と音圧 ($j_1^* = 2.296$)

水流量をさらに増加させた $j_1^* = 2.296$ では、これまでと異なる傾向が観察された (図 3.16)。チャーン流領域において $j_g^* = 0.280$ で音圧のピークが見られるものの、環状流となる前に音圧は再上昇し、 $j_g^* = 2.26$ まで増加し続けた。この時、チャーン流内でのピークが予測されるボイド率は、 $\alpha = 0.69 \sim 0.79$ である。また環状流が見られた計測点は一点しかないが、その時の音圧は若干減少していることが伺える。

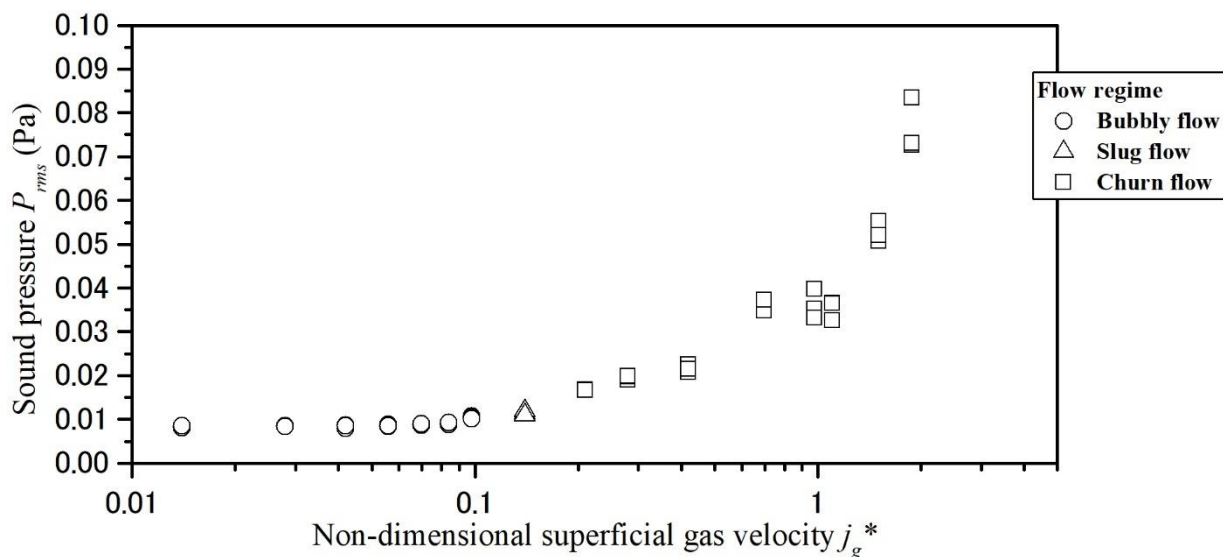


図 3.17 鋼管における無次元空気見かけ速度と音圧 ($j_1^* = 4.6$)

$j_1^* = 4.6$ では十分な空気流量を確保できなかったため、チャーン流領域までしか再現できなかったため、どのような傾向であるかを判別するにはデータ数が不十分であると考え (図 3.17)。また実験で行った最大流量の時のボイド率は 0.76 であった。しかし、これは環状流においてもドリフトフラックスモデルを使用した場合であり、式 3.19 を使用した場合は 0.81 となった。

続いて，先行研究にて行われたアクリル管での結果を示す．

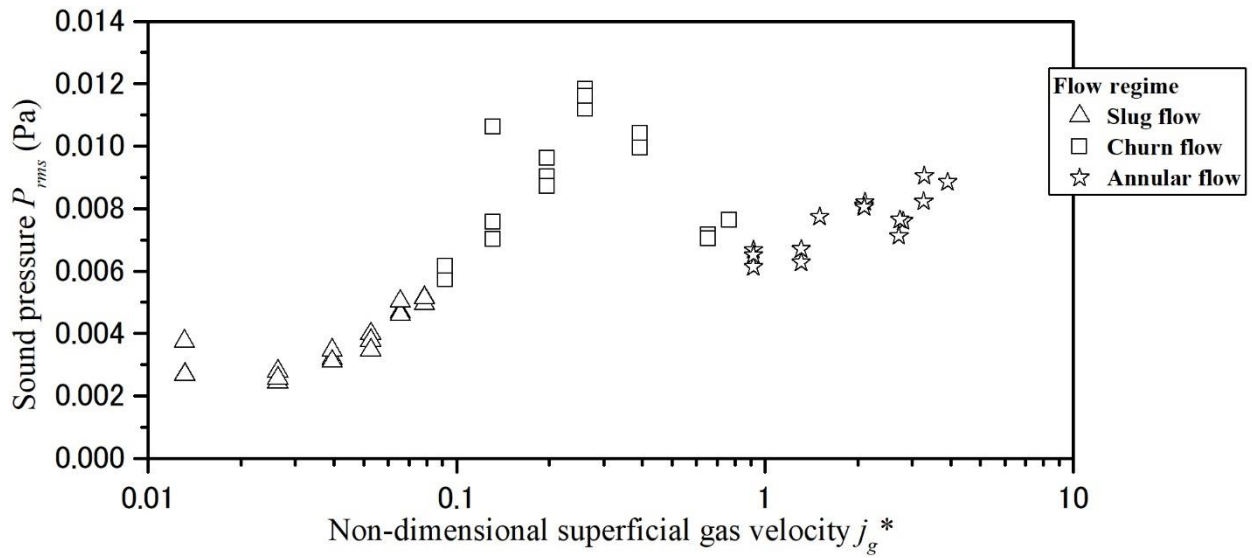


図 3.18 アクリル管における空気無次元見かけ速度と音圧 ($j_l^* = 0.215$)

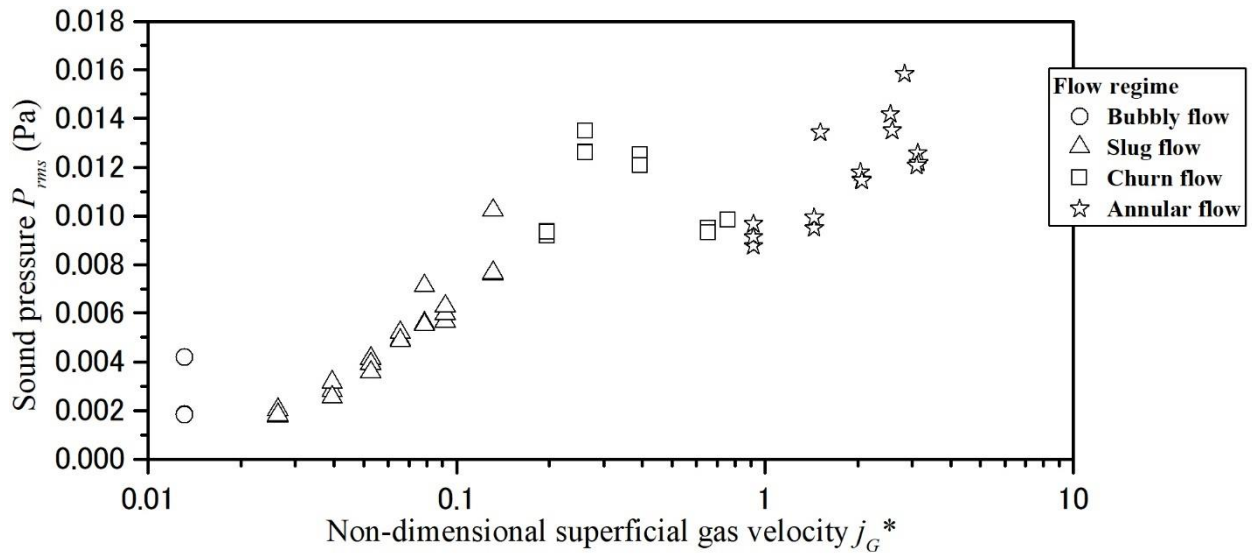


図 3.19 アクリル管における空気無次元見かけ速度と音圧 ($j_l^* = 0.431$)

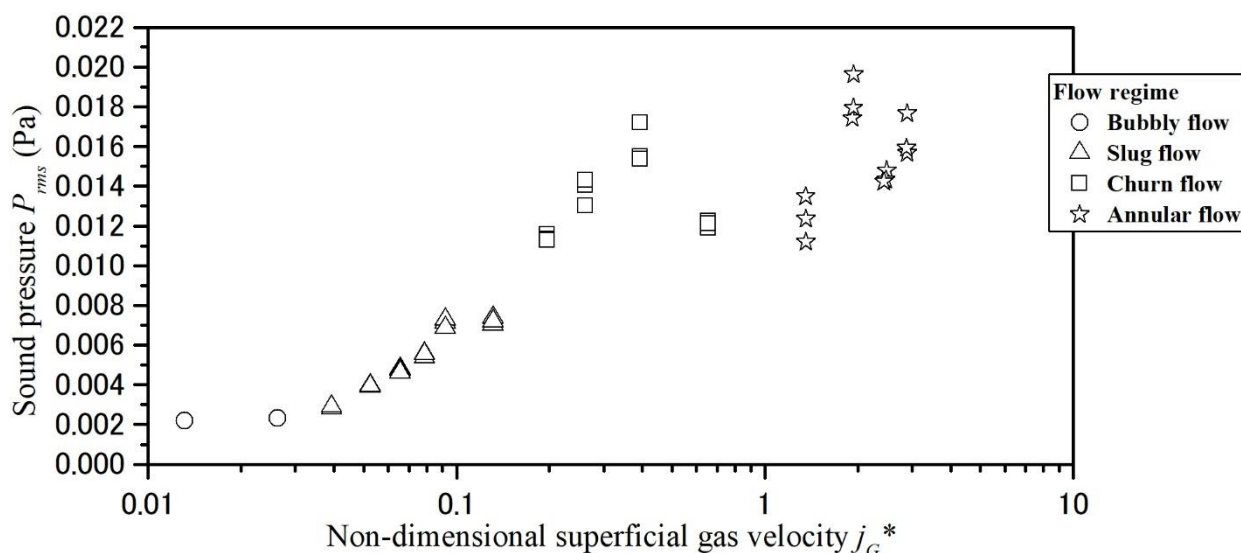


図 3.20 アクリル管における空気無次元見かけ速度と音圧 ($j_l^* = 0.861$)

$j_l^* = 0.215 \sim 0.861$ の範囲においては鋼管 $j_l^* = 0.229 \sim 0.918$ の結果と比較をすると、チャーン流領域までは空気流量の増加に伴って音圧の上昇が見られ、チャーン流領域内でピークを取った後に減少し、環状流領域で再び上昇するといった鋼管と同様の傾向が見られた (図 3.18, 3.19, 3.20)。

$j_l^* = 0.215$ におけるチャーン流領域でのピークが予測されるボイド率は $\alpha = 0.78 \sim 0.83$ である。また水流量を増やした場合、 $j_l^* = 0.431$, 0.861 においては、それぞれ $\alpha = 0.75 \sim 0.81$, $0.74 \sim 0.82$ となった。

$j_l^* = 0.215$ におけるチャーン流でのピーク前後の流れを動画で確認したところ、液スラグの長さが異なっている様子が観察された。 $j_g^* = 0.196$ では液スラグにある程度の長さがあり、液相と気泡により形成されている様子がうかがえる (図 3.21)。 $j_g^* = 0.393$ では液スラグが短く、後追いの気柱先端を識別するのも難しい状態が観察された (図 3.22)。それ以外の様相の違いを目視により捉えるのは困難であった。

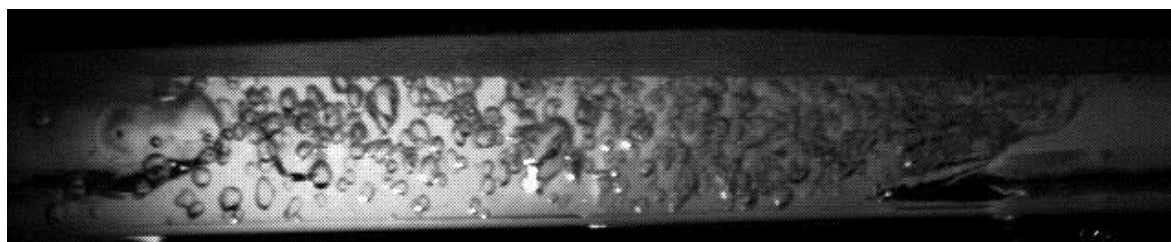


図 3.21 チャーン流 ($j_g^* = 0.196$)

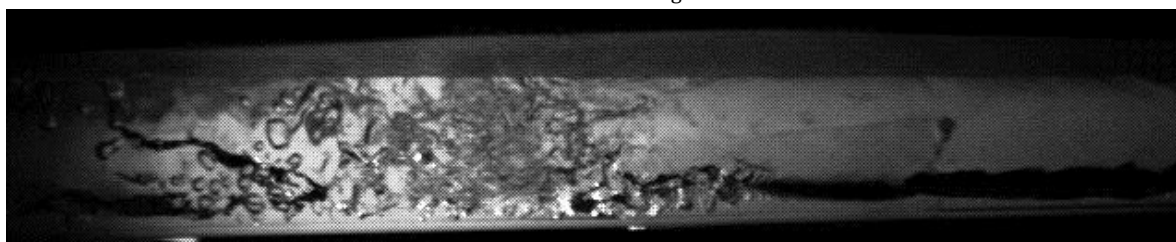


図 3.22 スラグ流 ($j_g^* = 0.393$)

また、 $j_1^* = 2.296$ では鋼管と異なり、チャーン流領域での音圧の再上昇は見られなくなった（図 3.23）．さらに、音圧のピークは環状流領域において見られたが、その時のピークが予測されるボイド率は $\alpha = 0.75 \sim 0.79$ であり、これまでのボイド率のピーク予想値と一致している．

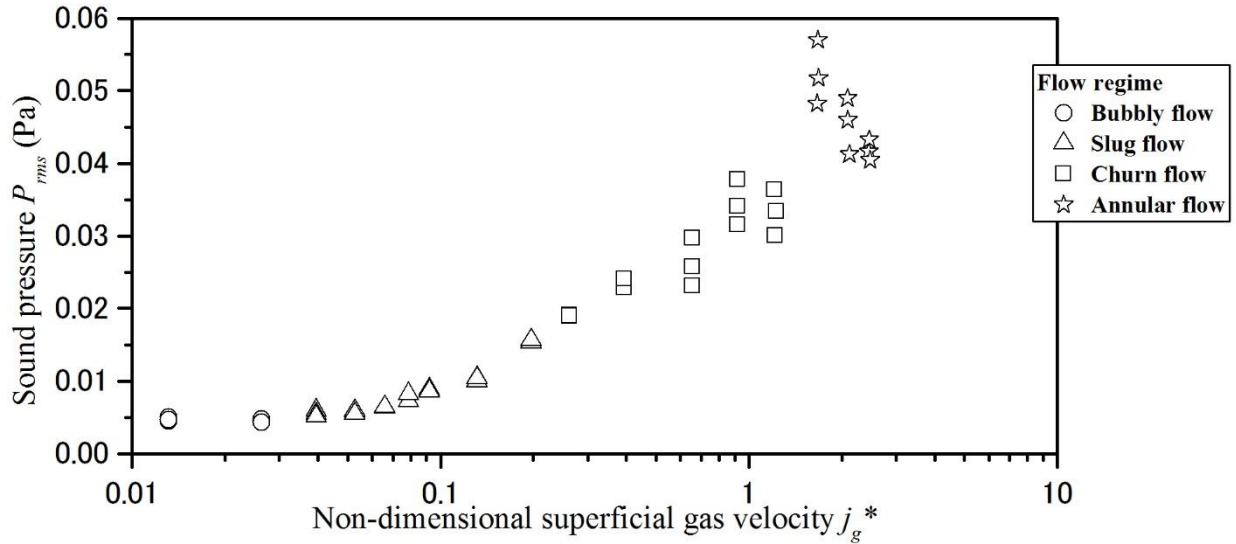


図 3.23 アクリル管における空気無次元見かけ速度と音圧（ $j_1^* = 2.153$ ）

$j_1^* = 0.43$ では鋼管と同様に十分な空気流量を確保できなかったため、チャーン流領域までしか再現できなかった．また実験で行った最大流量の時のボイド率は 0.76 であった．

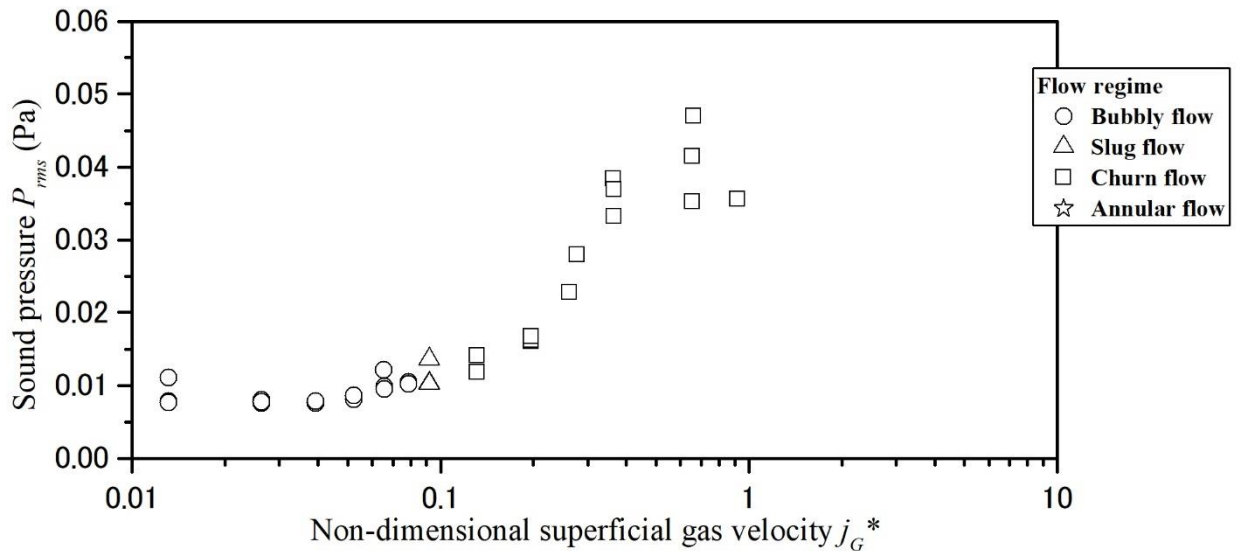


図 3.24 アクリル管における空気無次元見かけ速度と音圧（ $j_1^* = 4.3$ ）

鋼管とアクリル管の結果を比較すると、全体的に良い一致が見られ、特に水流量の小さい範囲においては同様の変化の傾向が見られた．さらに、鋼管とアクリル管で共通して、チャーン流領域内でのピーク予想ボイド率は $\alpha = 0.76 \sim 0.78$ となった．しかし、アクリル管 $j_1^* = 2.153$ 鋼管 $j_1^* = 2.296$ との比較では、異なる傾向が見られた．この傾向の違いについては次章で詳しく述べ

る。

鋼管，アクリル管に共通して見られた音圧の変化の傾向について，世古口らによるみかけの気水合計流速に対する液体塊速度の挙動に関する研究^[6]で，気水合計流速の増加に伴って，液体塊速度が極大値を取った後に，減少し再上昇することが報告されており，加えて，水見かけ速度がある一定以上になると減少傾向は見られなくなるという結果も本研究における実効値音圧の変化と定性的な一致が見られた．これらの結果より，本研究にて収録している流動音は気液二相流の流動様式の特徴が含まれる値であると考えられる．

3.4 FFT による周波数成分の解析

3.3 項で水流量を一定とし，空気流量を増やしていき，それに伴う流動様式の変化と音圧の変化を調査した結果，各流動様式に空気流量の増加に伴う変化の傾向が異なる事が確認された．そこで本節ではこれら領域での音波にどのような違いがあるかを詳細に探るため，FFT を行い波形の周波数成分を解析した．解析には窓関数 **hanning** を用いた．

まず，鋼管における解析結果について述べる．気泡流，スラグ流，チャーン流，環状流の全流動様式が確認される $j_1^* = 0.918$ に着目し，各流動様式に対して周波数解析を行った．しかしチャーン流においては音圧の減少傾向を示した点と増加傾向を示した点で区別をした．

以上より解析に使用した 5 点の情報を表 3.4 に，FFT の結果を図 3.25，3.26，3.27，3.28，3.29，3.30 に示す．表中に示すボイド率は流動様式を考慮し式 (3.16)，(3.17)，(3.18) から算出した値である．

表 3.4 鋼管において比較した 5 点の情報

流動様式	実効値音圧 (Pa)	j_1^*	j_g^*	ボイド率 α
気泡流	0.0018	0.918	0.014	0.30
スラグ流	0.0033	0.918	0.056	0.59
チャーン流 (音圧増加傾向)	0.013	0.918	0.210	0.69
チャーン流 (音圧減少傾向)	0.0093	0.918	0.699	0.81
環状流	0.011	0.918	2.633	0.81

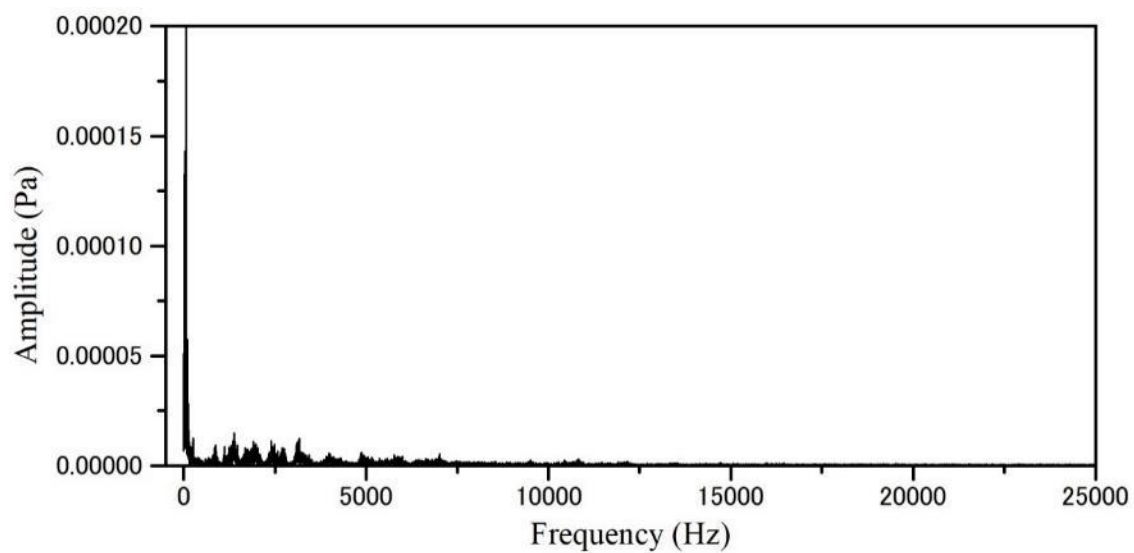


図 3.25 鋼管における気泡流

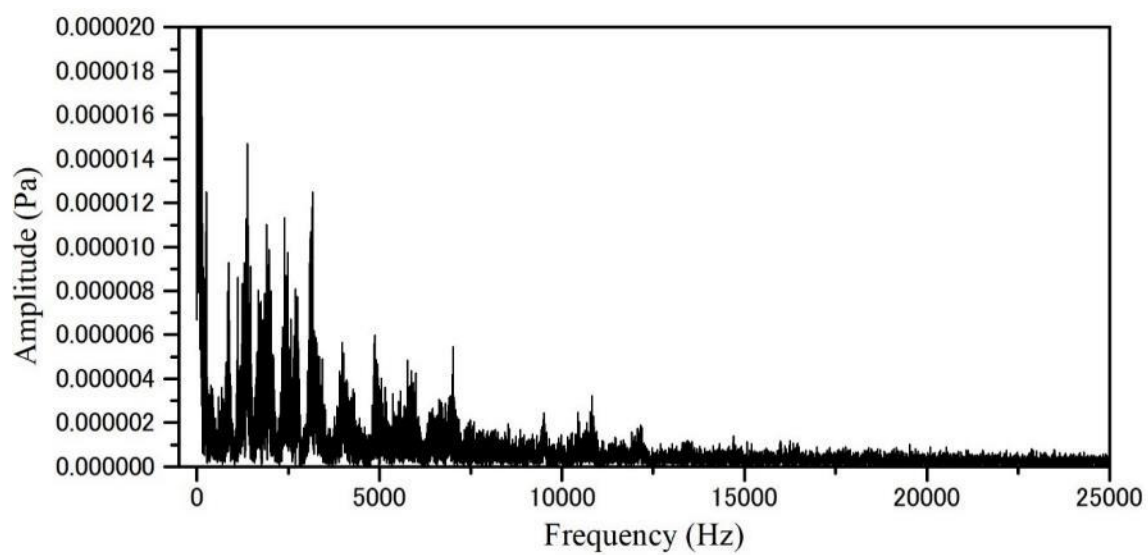


図 3.26 鋼管における気泡流（拡大）

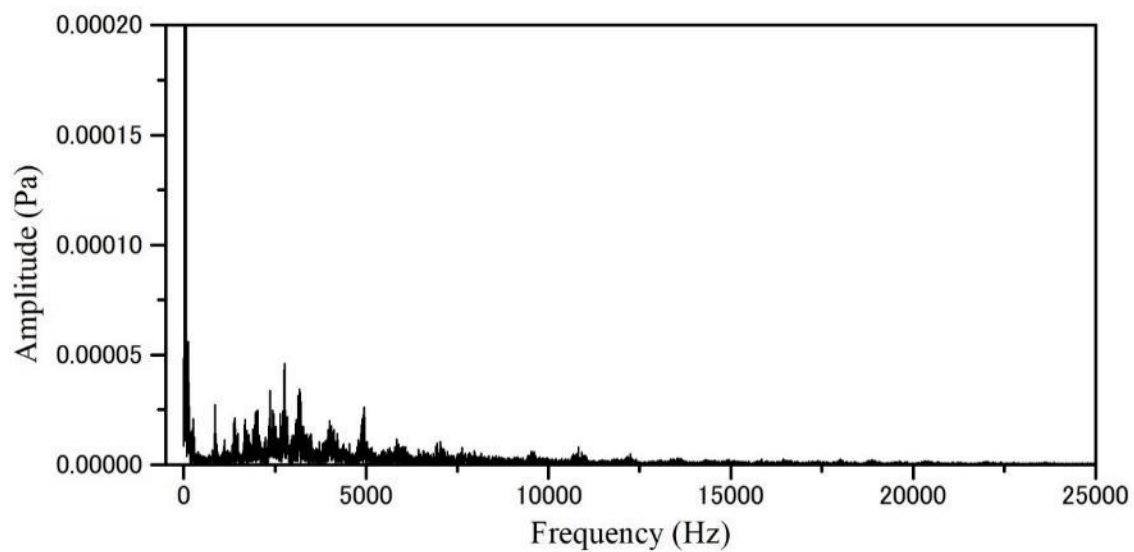


図 3.27 鋼管におけるスラグ流

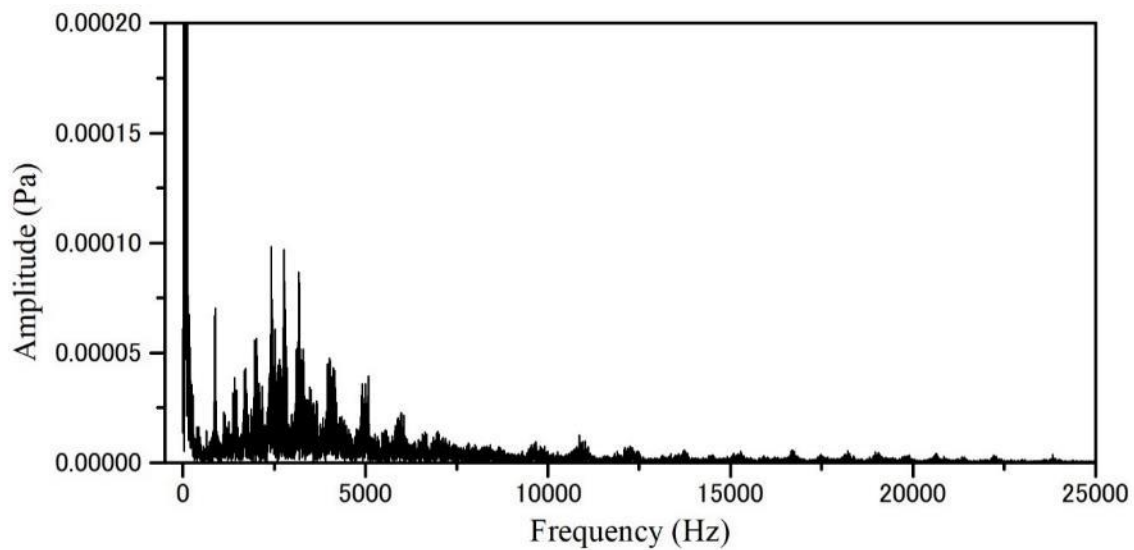


図 3.28 鋼管におけるチャーン流（音圧増加傾向）

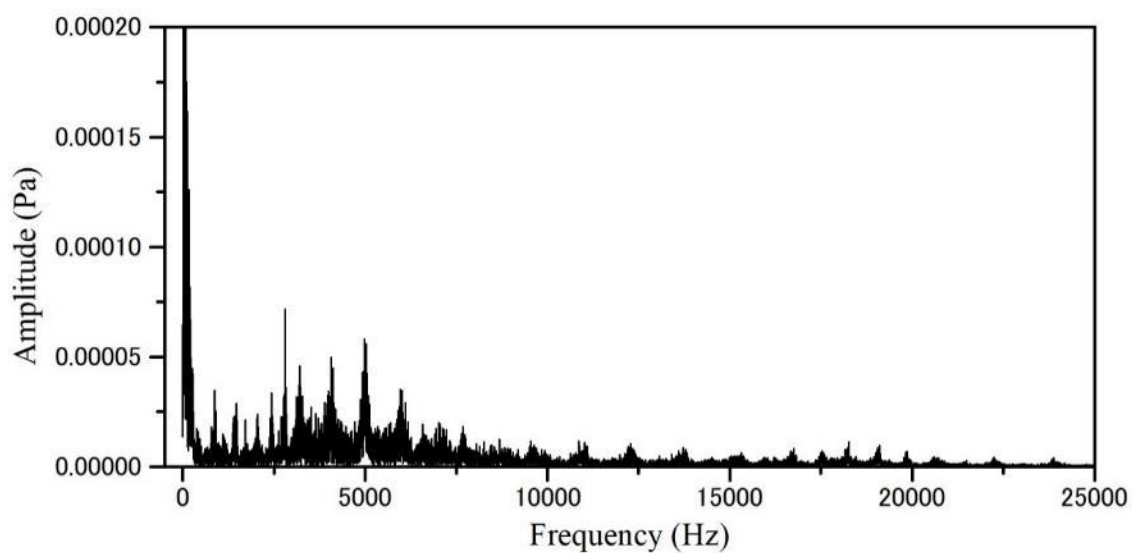


図 3.29 鋼管におけるチャーン流（音圧減少傾向）

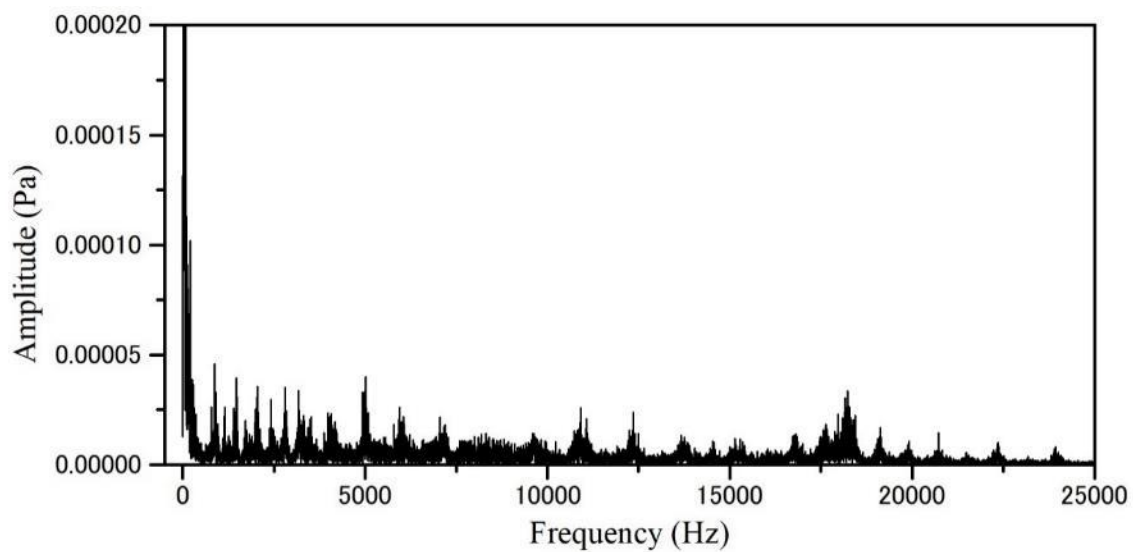


図 3.30 鋼管における環状流

気泡流では、他の流動様式と同じスケールにおいては、ほとんど特徴は見られなかった。そこで、スケールを拡大したものを図 3.26 に示す。図 3.26 では 1000Hz 付近にピークを持つ大きなスペクトルが見られ、このスペクトルの山はおよそ 1000Hz～7000Hz 付近にかけて確認された。

スラグ流では、こちらも 1000Hz～7000Hz 付近にかけてスペクトルの山が見られたが、そのピークの音圧は気泡流で確認された音圧に比べ、非常に大きな値である。また、スペクトルのピーク周波数はおよそ 3000Hz である。

チャーン流（音圧増加傾向）では、スラグ流と同様の傾向が見られた。スペクトルの山は 1000Hz～7000Hz 付近にかけて見られ、そのピークは 3000Hz である。また、ピークの音圧はスラグ流でみられた音圧よりも増加している。

チャーン流（音圧減少傾向）では、1000Hz～7000Hz の音圧が減少し、ピークの周波数は 5000Hz へと推移している様子がみられた。また、10000Hz 以上の広い周波数域に渡って小さなスペクトルが一定間隔で確認できる。

環状流では、1000Hz～7000Hz に渡って全体的にスペクトルの山が確認されるが、特定の周波数にピークは見られなかった。またチャーン流（音圧減少傾向）で見られた、周波数 10000Hz 以降の小さなスペクトル群は、音圧が上昇しており、18000Hz にはスペクトルのピークが見られた。

続いてアクリル管において、鋼管の解析で使用した 5 点と近い流量において同様に解析を行った。解析に使用した点の情報を表 3.5、解析結果を図 3.31, 3.32, 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 に示す。

表 3.5 アクリル管において比較した 5 点の情報

流動様式	実効値音圧 (Pa)	j_l^*	j_g^*	ボイド率 α
気泡流	0.0022	0.861	0.013	0.28
スラグ流	0.0039	0.861	0.052	0.45
チャーン流 (音圧増加傾向)	0.011	0.861	0.197	0.70
チャーン流 (音圧減少傾向)	0.012	0.861	0.656	0.82
環状流	0.014	0.861	2.486	0.89

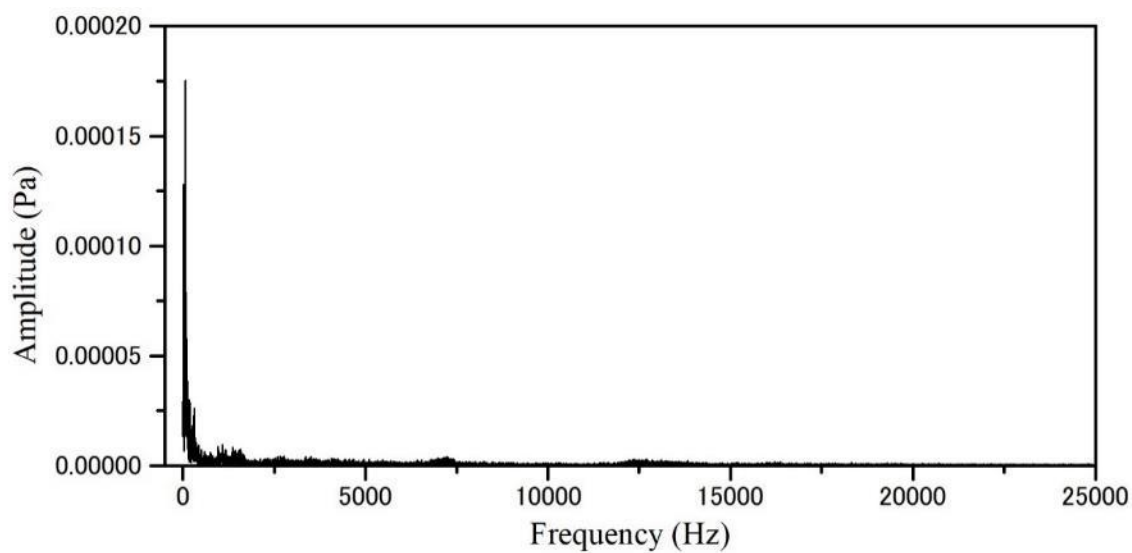


図 3.31 アクリル管における気泡流

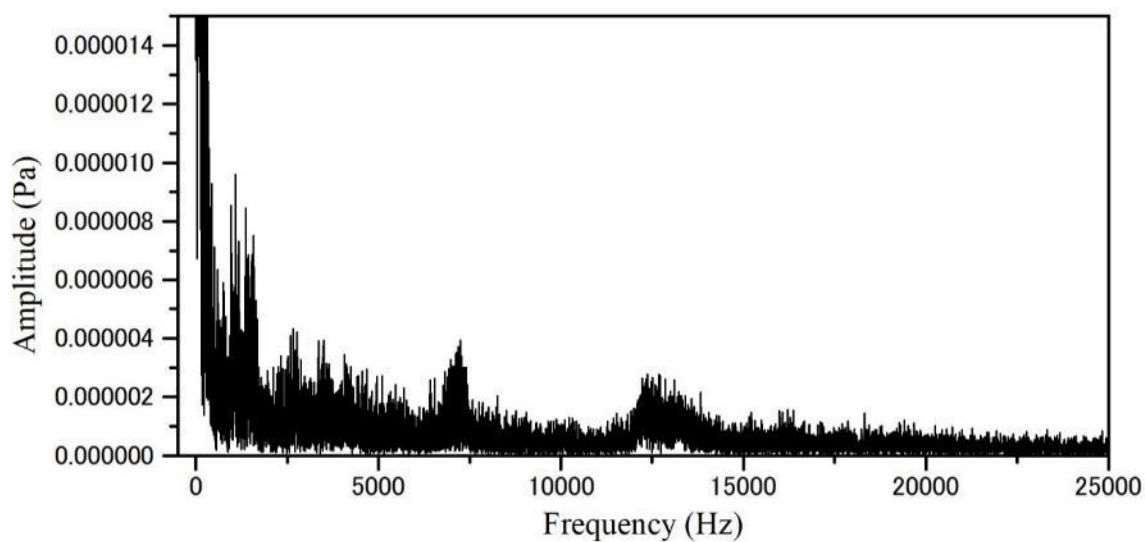


図 3.32 アクリル管における気泡流（拡大）

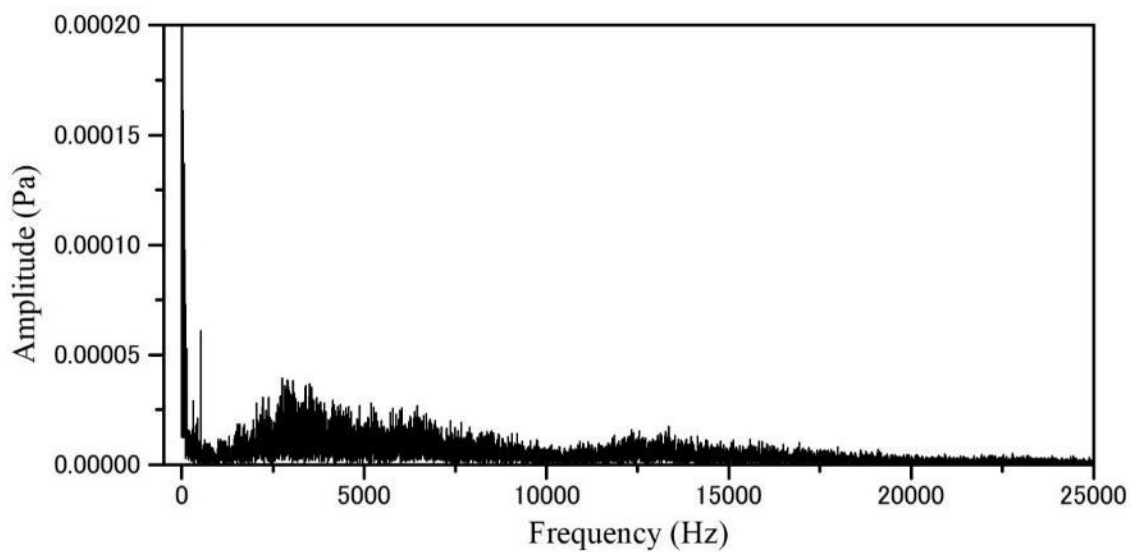


図 3.33 アクリル管におけるスラグ流

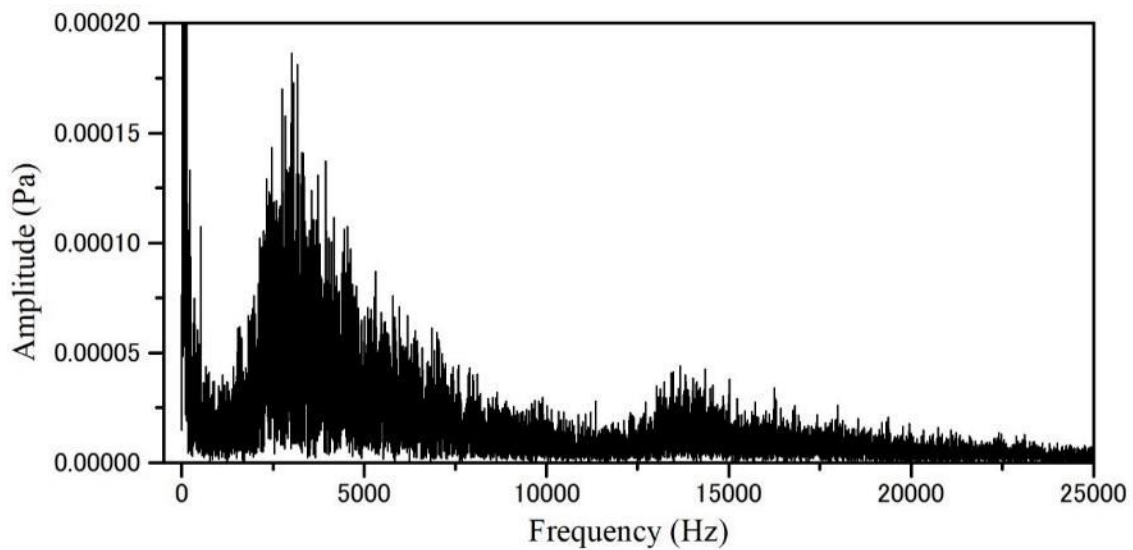


図 3.34 アクリル管におけるチャーン流（音圧増加傾向）

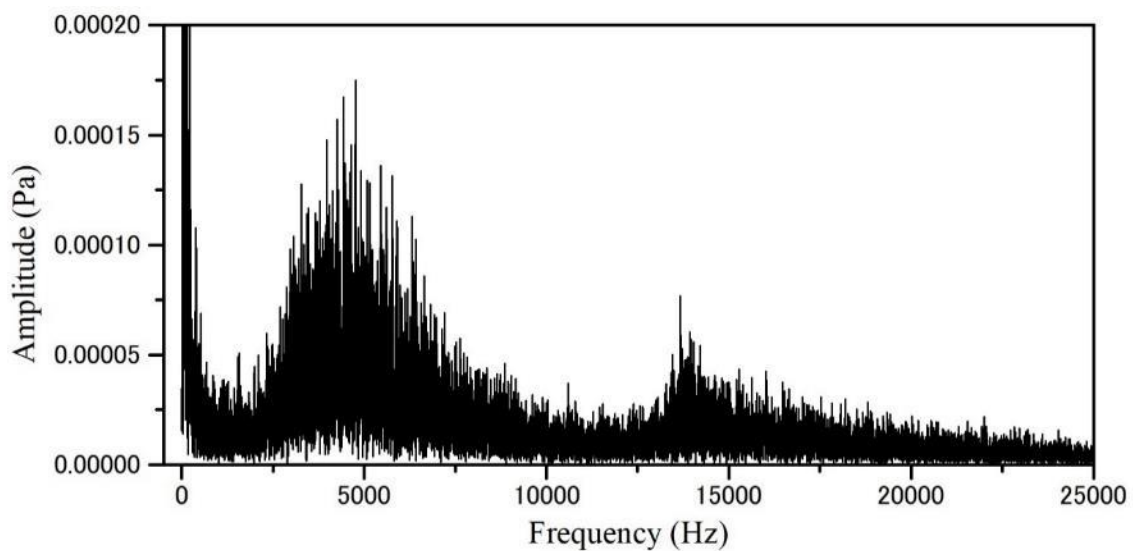


図 3.35 アクリル管におけるチャーン流（音圧減少傾向）

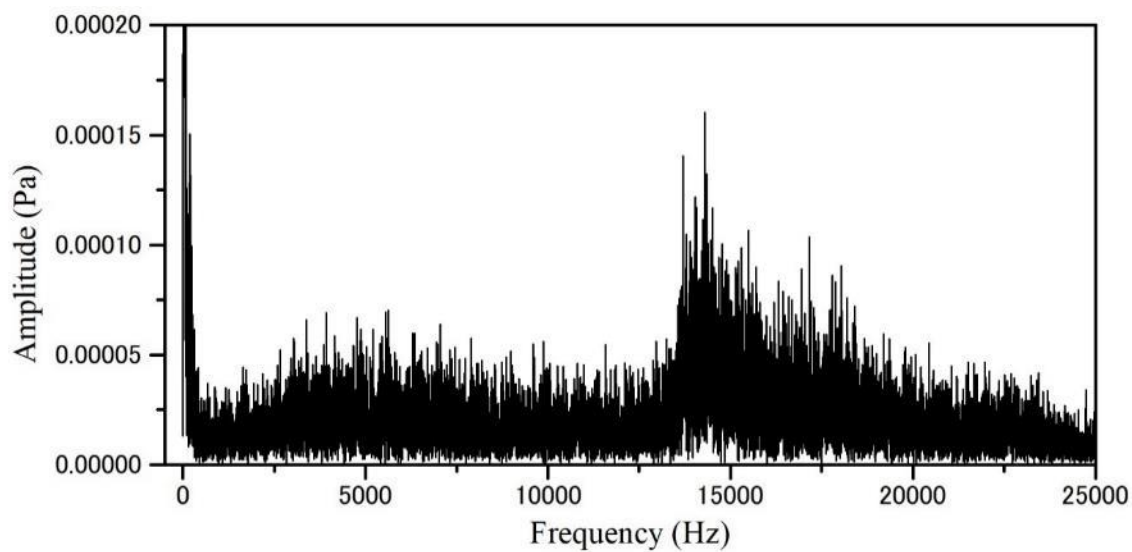


図 3.36 アクリル管における環状流

気泡流では 1000Hz 以下の周波数に大きなスペクトルを持つ。また 1000Hz～9000Hz までの範囲に着目すると、1000Hz～2000Hz の間や、3000Hz、4000Hz、7000Hz 近傍などに小さなスペクトルが散見して見られる。また 1200Hz～14000Hz にまたがるように小さなスペクトルの山が見られた。

スラグ流では、二つのスペクトルの山がある。一つ目の山は鋼管と同様に 1000Hz～9000Hz にかけて見られ、ピークは同じく 3000Hz 近傍である。二つ目の山は 14000Hz 付近にピークを持ち、一つ目の山と比べると最大音圧が小さい。

チャーン流（音圧増加傾向）では、スラグ流と同様、二つの大きなスペクトルが見られたが、その音圧のピークはスラグ流のものよりも増加している。

チャーン流（音圧減少傾向）では、1000Hz～9000Hz のピークが 4000Hz 近傍へと推移し、14000Hz 近傍の音圧は増加している。

環状流では、1000Hz～9000Hz のスペクトルの音圧が小さくなり、特定の周波数にピークが見られない。また、14000Hz 付近の音圧が低周波数側の音圧よりも大きくなり、さらに 14000Hz 以上の高周波数域のスペクトルが全体的に大きくなっている。

鋼管とアクリル管の結果を比較すると、まず、スペクトルの山の形状について、鋼管での結果はアクリル管の結果のようにピークの前後になだらかに降下するのではなく、いくつかの鋭いピークが一定間隔に並んで形成されている。これは管壁材質による機械的特性によって発生していると思われるが詳細な原因は不明である。また、アクリル管で行われた先行研究においては、これらの周波数解析の結果より、1000Hz～9000Hz、14000Hz～20000Hz の二つの領域におけるスペクトルの比較を行い、表 3.6、図 3.37 に示すように液相または気相が主流方向に連続か不連続かによって分類する流動様式であれば判別が可能であることを示した。しかし、鋼管においては周波数 14000Hz 以降の比較的高周波数でのスペクトルが見られなくなるため、同様の方法では流動様式の判別は困難である。

表 3.6 各相の連続性による流動様式の分類

		気相	
		連続	不連続
液相	連続	層状分離流 主流方向に気相、液相とも連続な流れ（環状流）	気相分散流 主流方向に液相が連続であり、気相が不連続な流れ（気泡流）
	不連続	液相分散流 主流方向に気相が連続であり、液相が不連続な流れ（噴霧流）	栓状分離流 主流方向に液相、気相とも不連続な流れ（スラグ流、チャーン流）

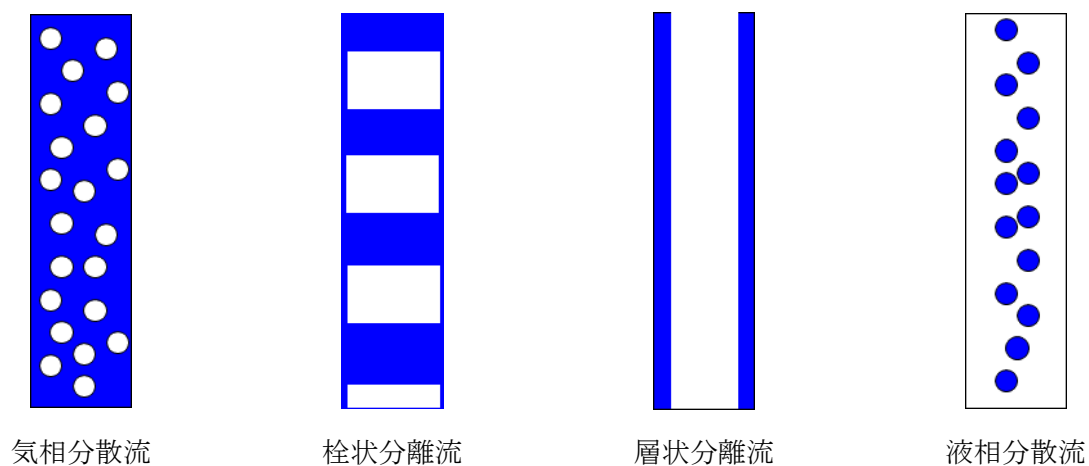


図 3.37 各相の連続性による流動様式の分類

次に水流量を一定とし，空気流量を増やしていった場合の周波数成分の変化を調べた．鋼管での結果を図 3.38，3.39，3.40，3.41，3.42，3.43 に，アクリル管での結果を図 3.44，3.45，3.46，3.47，3.48 に示す．

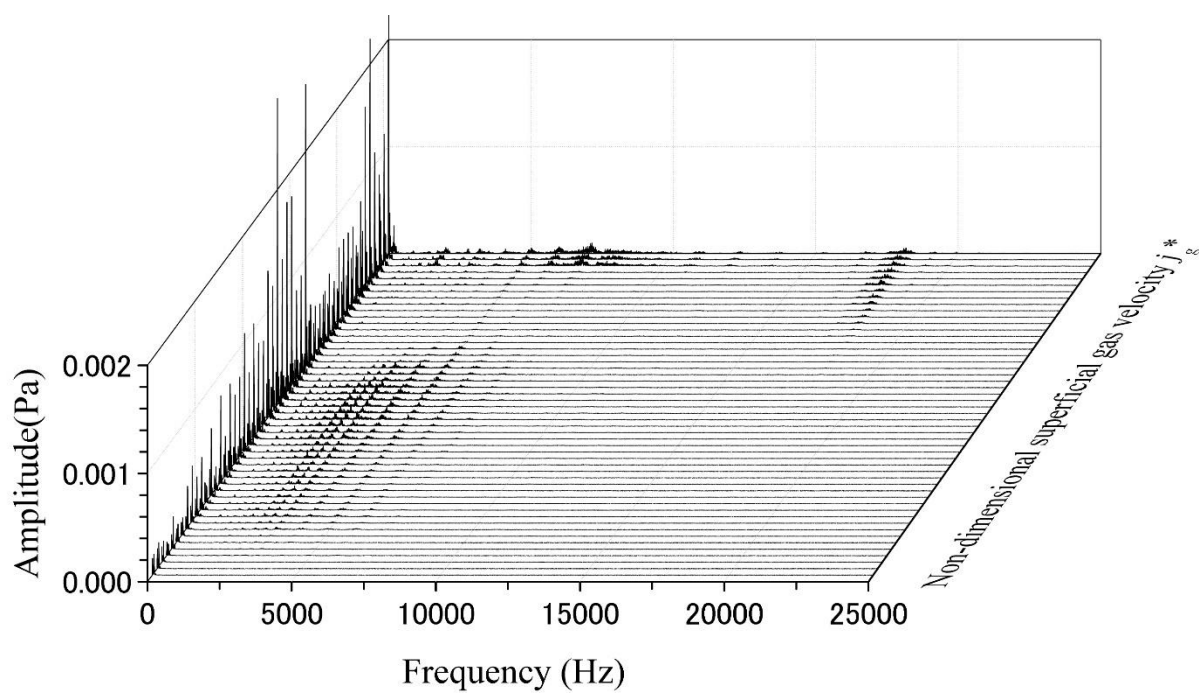


図 3.38 鋼管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化（ $j_l^* = 0.229$ ）

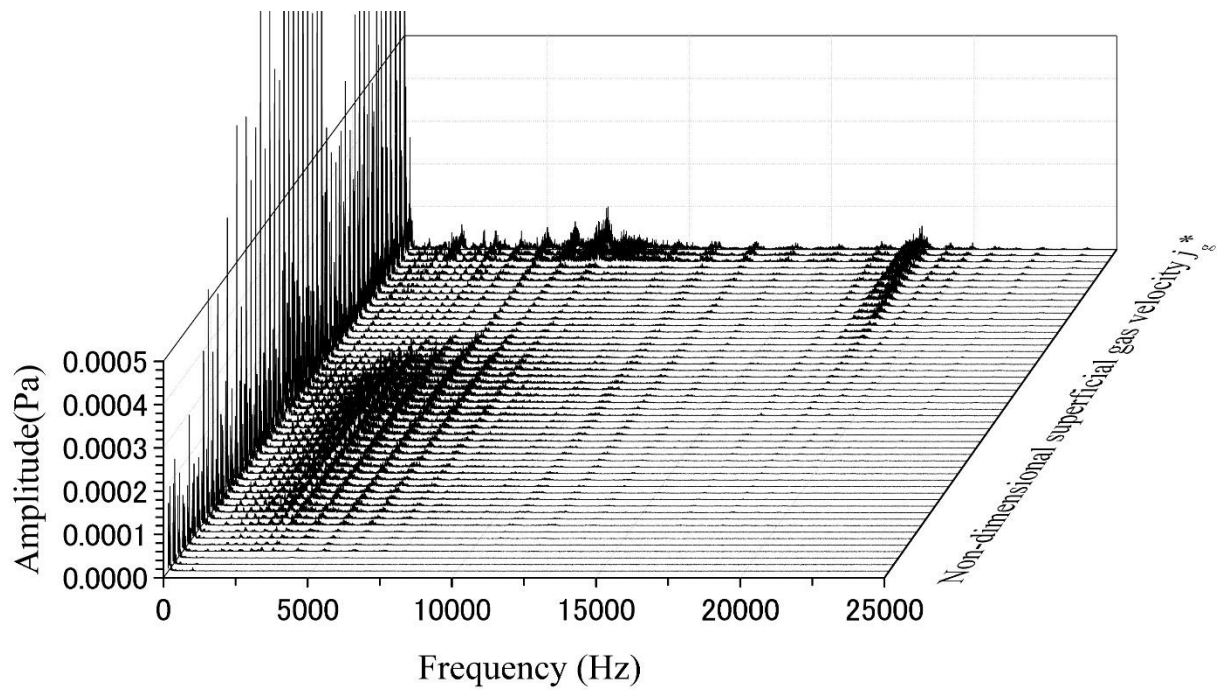


図 3.39 鋼管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化（拡大）（ $j_g^* = 0.229$ ）

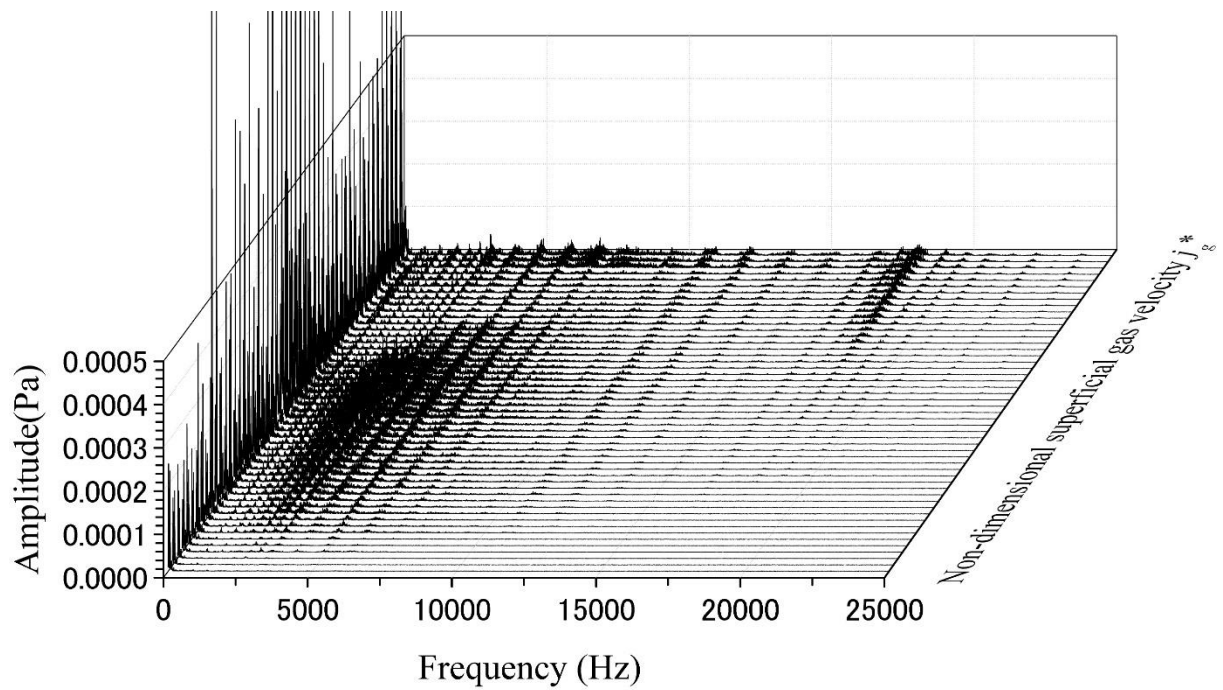


図 3.40 鋼管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化（ $j_g^* = 0.457$ ）

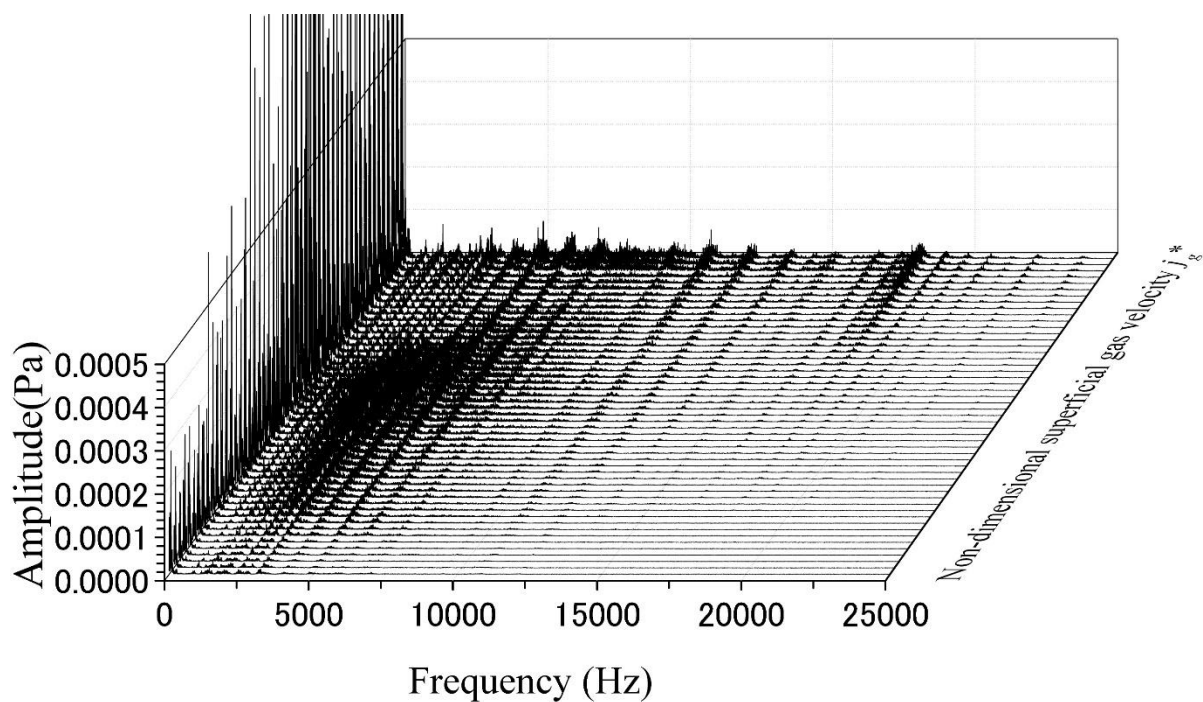


図 3.41 鋼管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化 ($j_l^* = 0.918$)

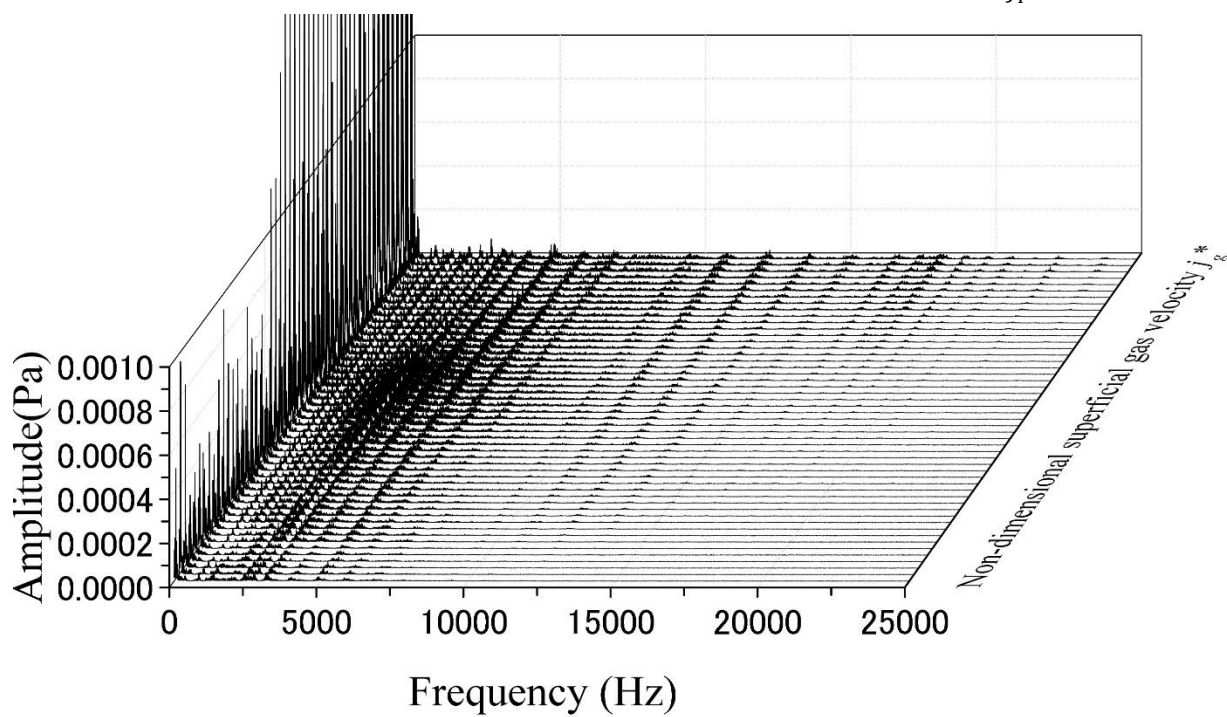


図 3.42 鋼管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化 ($j_l^* = 2.296$)

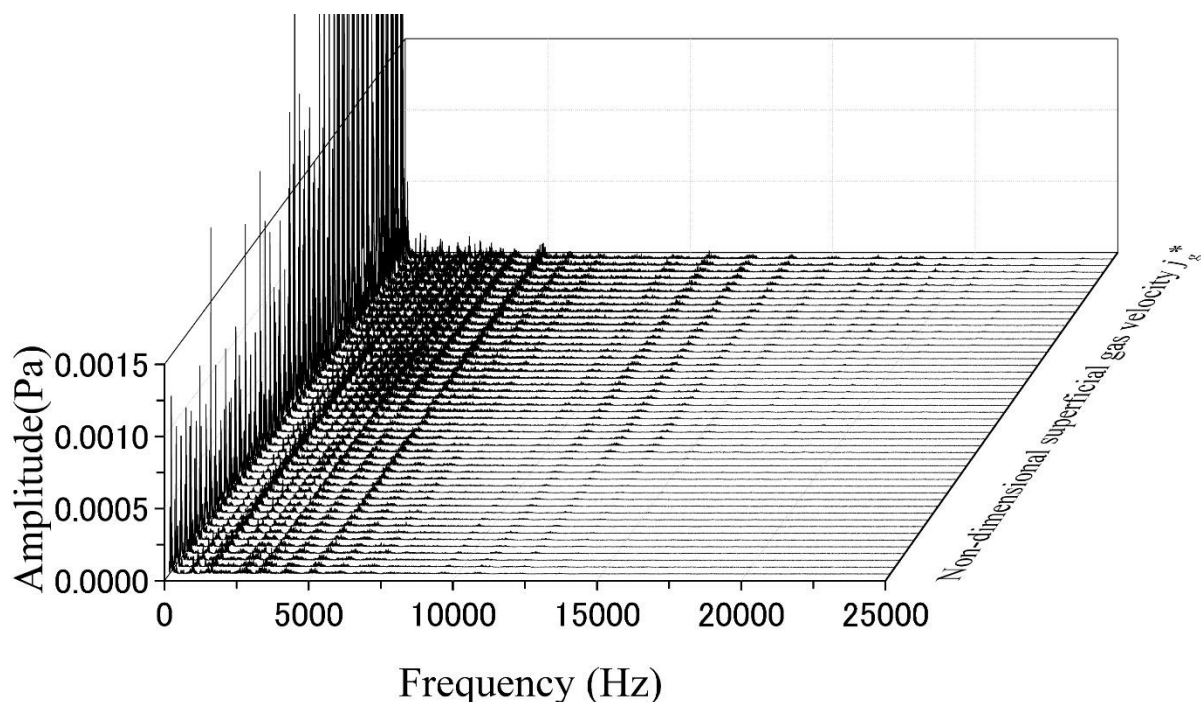


図 3.43 鋼管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化 ($j_1^* = 4.6$)

鋼管の結果について、初めに、 $j_1^* = 0.229$ における結果を図 3.38 に示す。図 3.38 はアクリル管での $j_1^* = 0.215$ の結果である図 3.44 と縦軸のスケールを等しくしている。これらの結果を比較すると、鋼管ではアクリル管に比べて全体的に音圧が小さいことがわかる。そこで、流動様式ごとの周波数の特徴を見やすくするために全グラフの縦軸のスケールは拡大して示す。

$j_1^* = 0.229 \sim 0.918$ において、空気流量の増加に伴って各流動様式の周波数成分の変化は前述の傾向と同様であることが確認できる。しかし、空気流量が最大となった場合、広い周波数に渡って 7000Hz 付近にピークを持つスペクトルが見られた。この大きなスペクトルは鋼管では管内径がアクリル管よりも小さいために、同じ空気流量を流しても管内の流速が速くなり、流動様式がさらに別のものへと変化したためだと考えられる。本研究において、判別を行う流動様式は気泡流、スラグ流、チャン流、環状流の 4 つであるため、このデータは流動様式の判別からは除外する。

$j_1^* = 2.296 \sim 4.6$ では、環状流領域で見られていた 18000Hz のピークが見られなくなった。

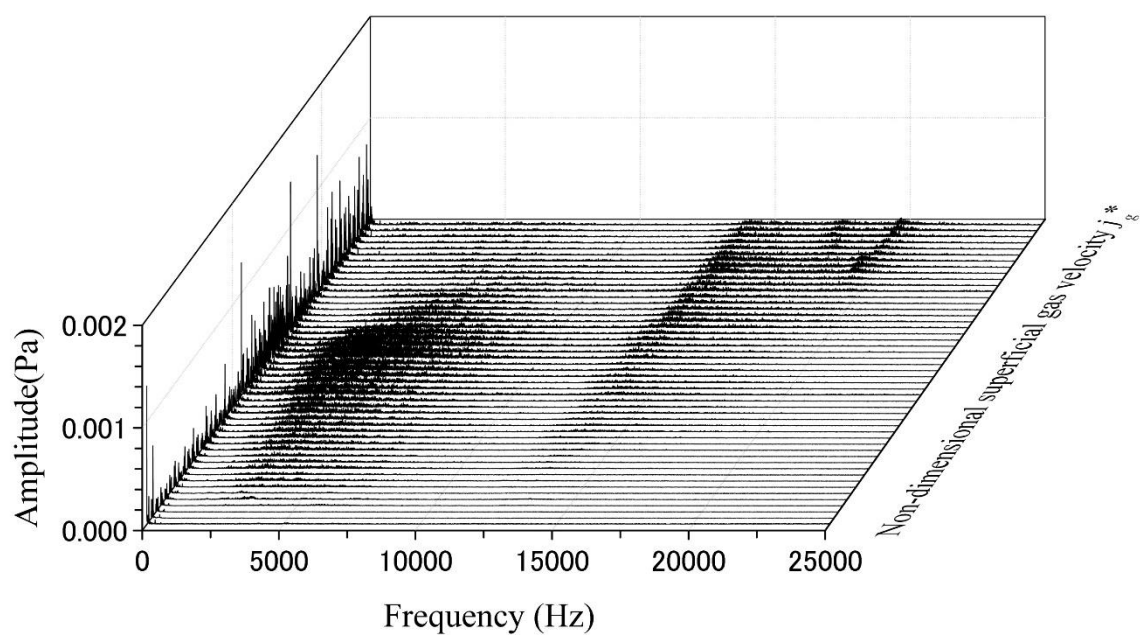


図 3.44 アクリル管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化
($j_1^* = 0.215$)

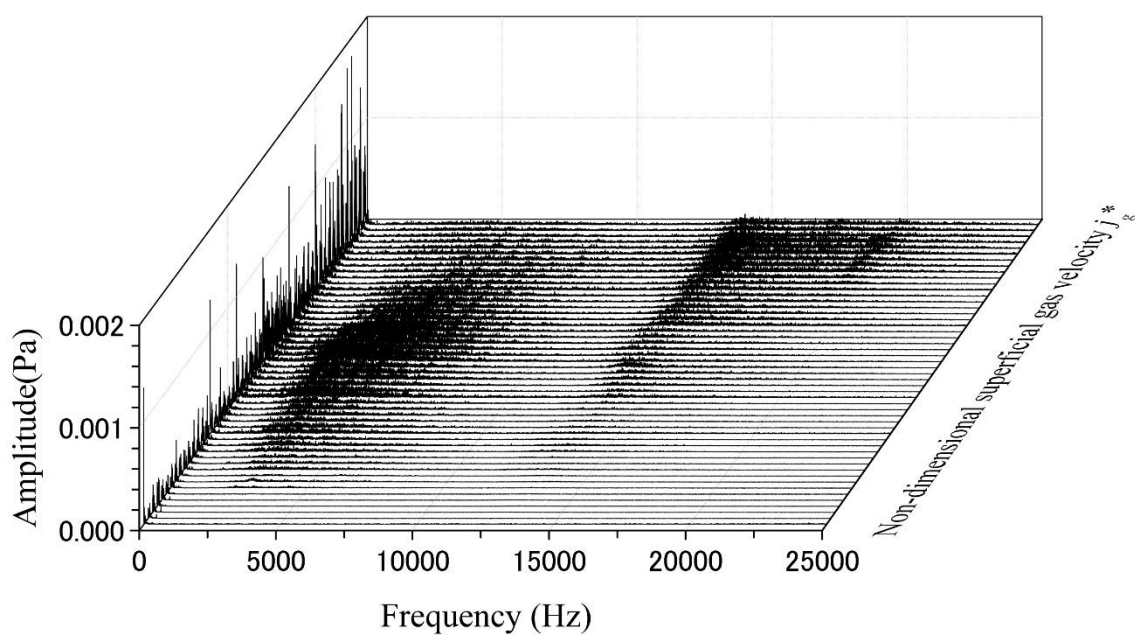


図 3.45 アクリル管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化
($j_1^* = 0.431$)

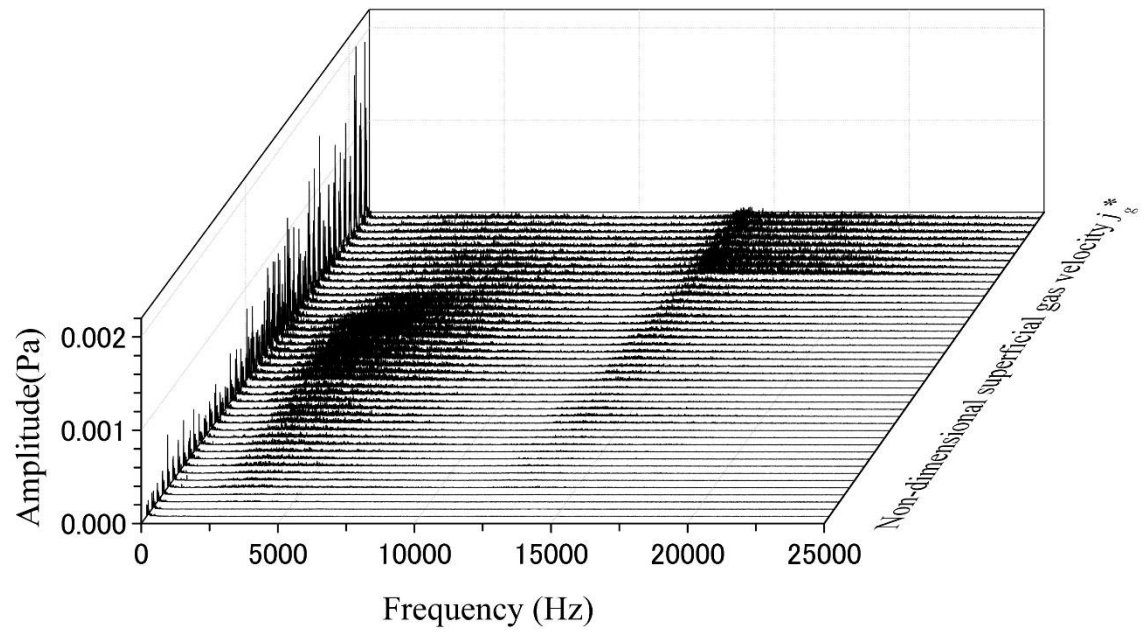


図 3.46 アクリル管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化
($j_1^* = 0.861$)

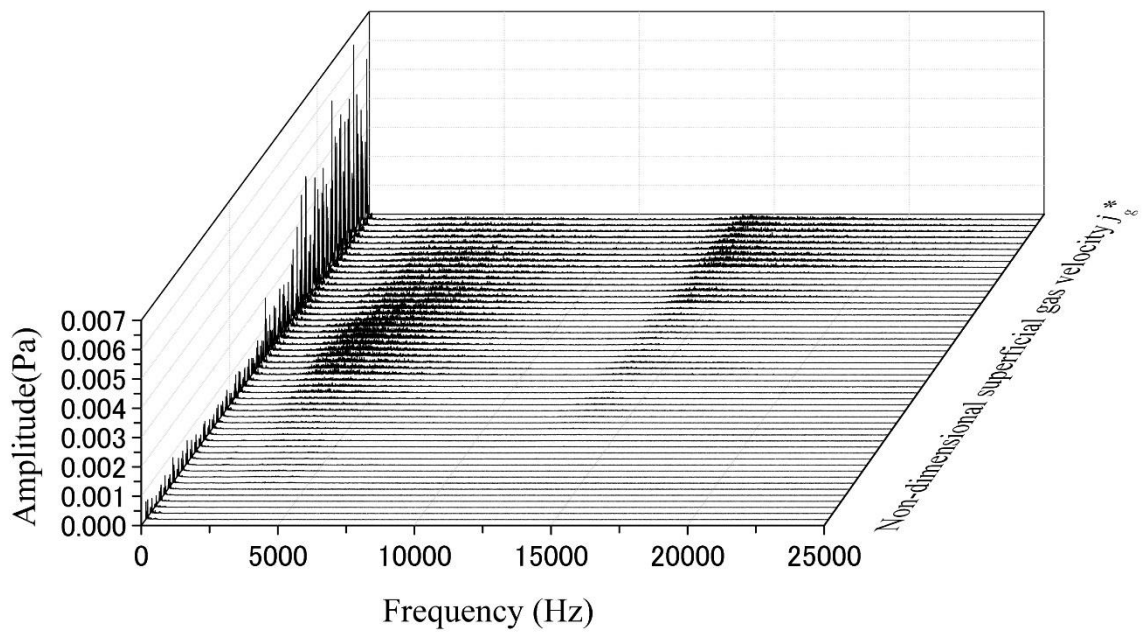


図 3.47 アクリル管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化
($j_1^* = 2.153$)

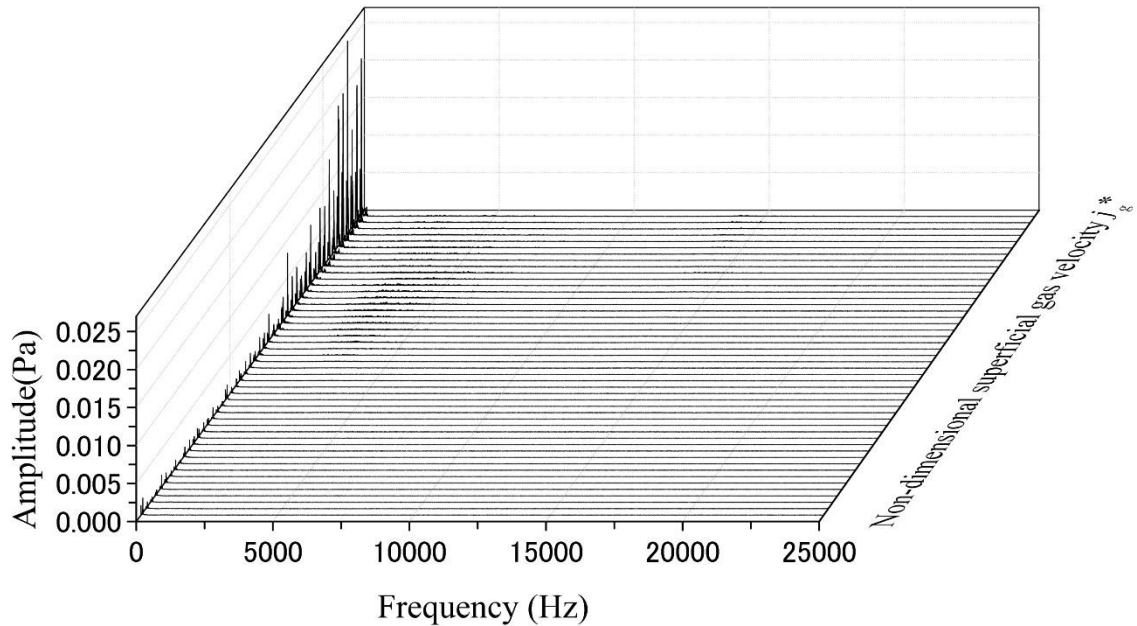


図 3.48 アクリル管における空気無次元見かけ速度の変化による周波数成分の変化
($j_{l1}^* = 4.3$)

アクリル管での結果について、まず図 3.44 に $j_{l1}^* = 0.215$ の結果を示す。空気流量の増加に伴い、徐々にスペクトルが栓状分離流形、層状分離流形と変化するのが観測できる。また他水流量でも同様の傾向が観測され、気相分散流形、栓状分離流形、層状分離流形と変化するのわかる（図 3.45, 3.46, 3.47, 3.48）。

$j_{l1}^* = 0.861$ の結果より、これより小さい水流量では見られていた環状流領域における 18000Hz 近傍のスペクトルの山が見られず、14000Hz 以降のスペクトルが全体的に増えている傾向が観測された。この結果と $j_{l1}^* = 0.215$ の結果を比較すると、17000Hz 近傍、19000Hz 近傍のスペクトルの山は空気流量が大きいほど顕著に見られることから空気流量がこれらスペクトルに関係していることが考えられるが、水流量もこれらスペクトルの発生に影響していることが推測できる。この 18000Hz 近傍の減少は鋼管においても同様に観測された。

また、3.3 項で触れていた実効値音圧の音圧の増減の変化について、鋼管では $j_{l1}^* = 0.918$ でチャーン流領域で音圧の減少傾向が確認された一方で、アクリル管 ($j_{l1}^* = 0.861$) では減少傾向が見られなかった事について、これまでの周波数解析の結果の比較から、鋼管ではアクリル管と比較して低周波数領域は変わらず、高周波数領域が減衰されやすい傾向が見られている。そのため、鋼管においてチャーン流領域で高周波数域の音圧の増加が抑制されて、低周波数域の減少傾向はそのままとなるために減少の傾向が強調されたためだと考えられる。これはアクリル管と鋼管の密度差によって、管壁による音の透過損失が異なり、その結果、より密度の大きい鋼管では高周波数域での音の減衰が顕著になったためだと思われる。

これらの結果より、鋼管では全体的に音圧が小さくなり、また特に 14000Hz 以降の比較的高周波数域での音圧の減少が顕著になるため、アクリル管と同様の判別法では、流動様式の判別は行えないことがわかった。

3.5 変動音解析

FFTによる解析ではアクリル管と鋼管で周波数 1000～7000Hz 付近の比較的低周波数域では共通した傾向がみられたものの、高周波数域における傾向が異なったため、周波数成分のみでは流動様式の判別は難しいことがわかった。そこで、人間の聴覚に合わせた解析である変動音解析を行った。

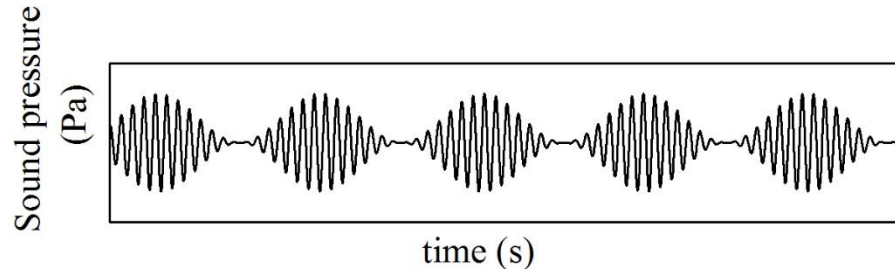


図 3.49 振幅変調音

図は周波数 1000Hz の音波が振幅変調している波の例である。この波に対し FFT を行った場合、周波数のスペクトルは 1000Hz と 1000Hz に近い周波数にのみ現れる。しかし我々の耳には 1000Hz 帯域の音が振幅変調の周波数で変動しているように聞こえる。図 3.49 のような振幅変調している波形を一度音の大きさ（ラウドネス）の時間変化に置き換えることにより、振幅変調の周波数を変動周波数、振幅変調の平均振幅を変調の大きさ（Depth of Loudness Fluctuation）として解析を行う。こうした周波数解析のみではつかみづらい変調を解析するのが変動音解析である。

解析条件は、変動周波数は 1～100Hz の範囲をバンド幅 5Hz、ステップ幅 5Hz、周波数は 1 オクターブごとに 45Hz～12500Hz で行った。鋼管 $j_1^* = 0.457$ 、アクリル管 $j_1^* = 0.431$ における、流動様式ごとの変動音解析結果を図 3.50、3.51、3.52、3.53、3.54、3.55、3.56、3.57 に示す。

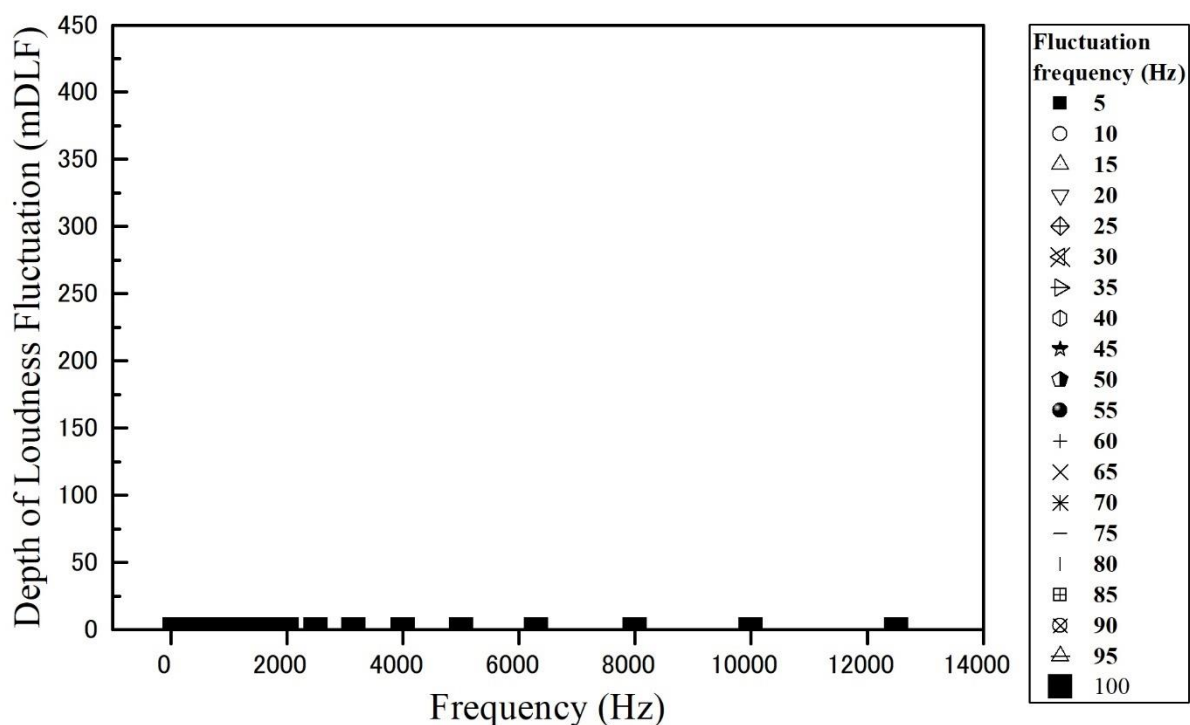


図 3.50 鋼管における気泡流の変動音解析結果 ($j_1^* = 0.457$ $j_g^* = 0.0140$)

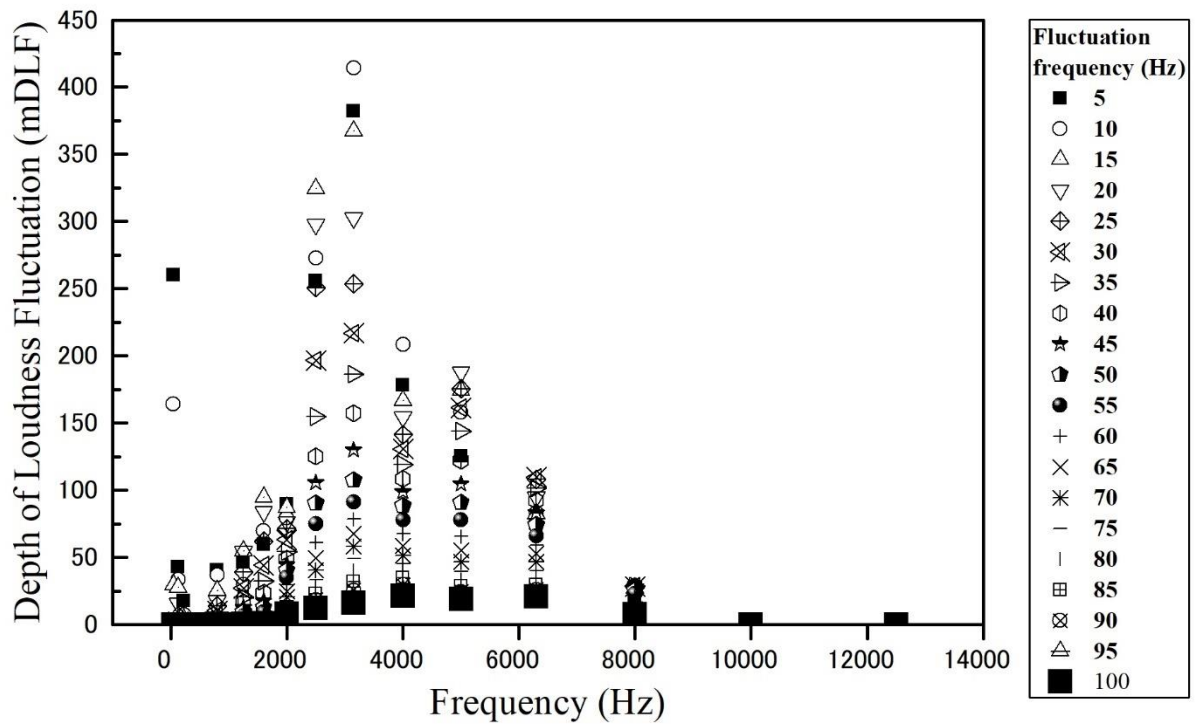


図 3.51 鋼管におけるスラグ流の変動音解析結果 ($j_l^* = 0.457$ $j_g^* = 0.0559$)

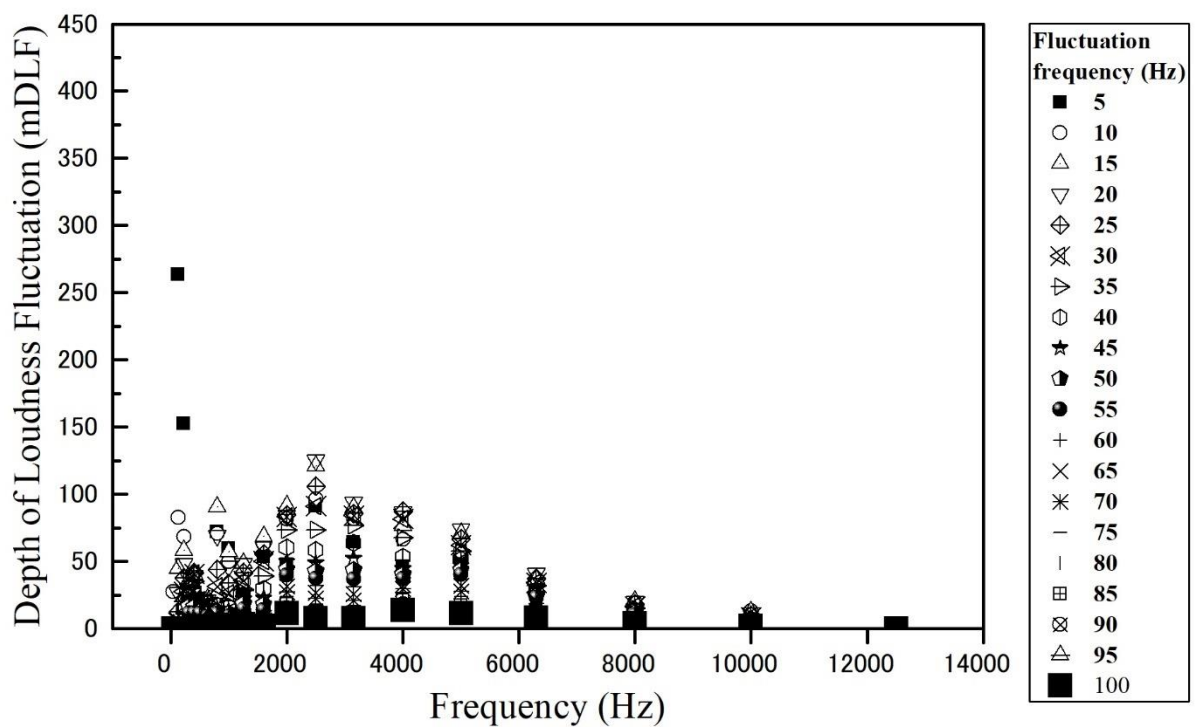


図 3.52 鋼管におけるチャーン流の変動音解析結果 ($j_l^* = 0.457$ $j_g^* = 0.280$)

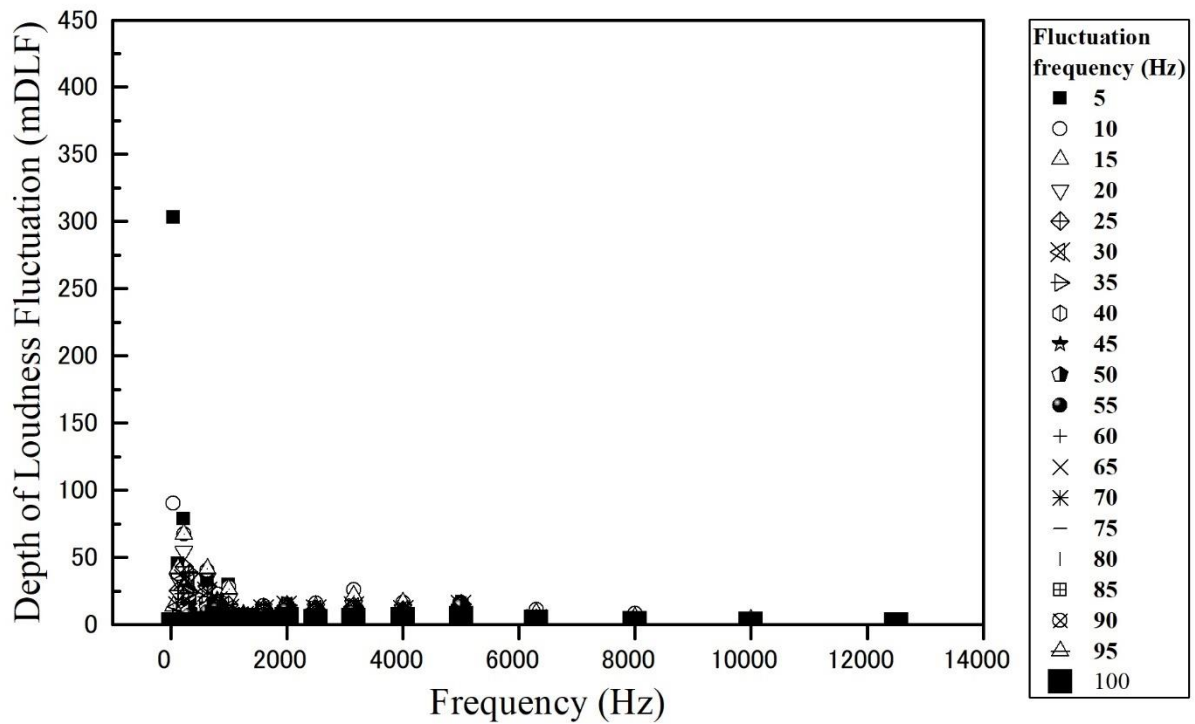


図 3.53 鋼管における環状流の変動音解析結果 ($j_l^* = 0.457$ $j_g^* = 2.80$)

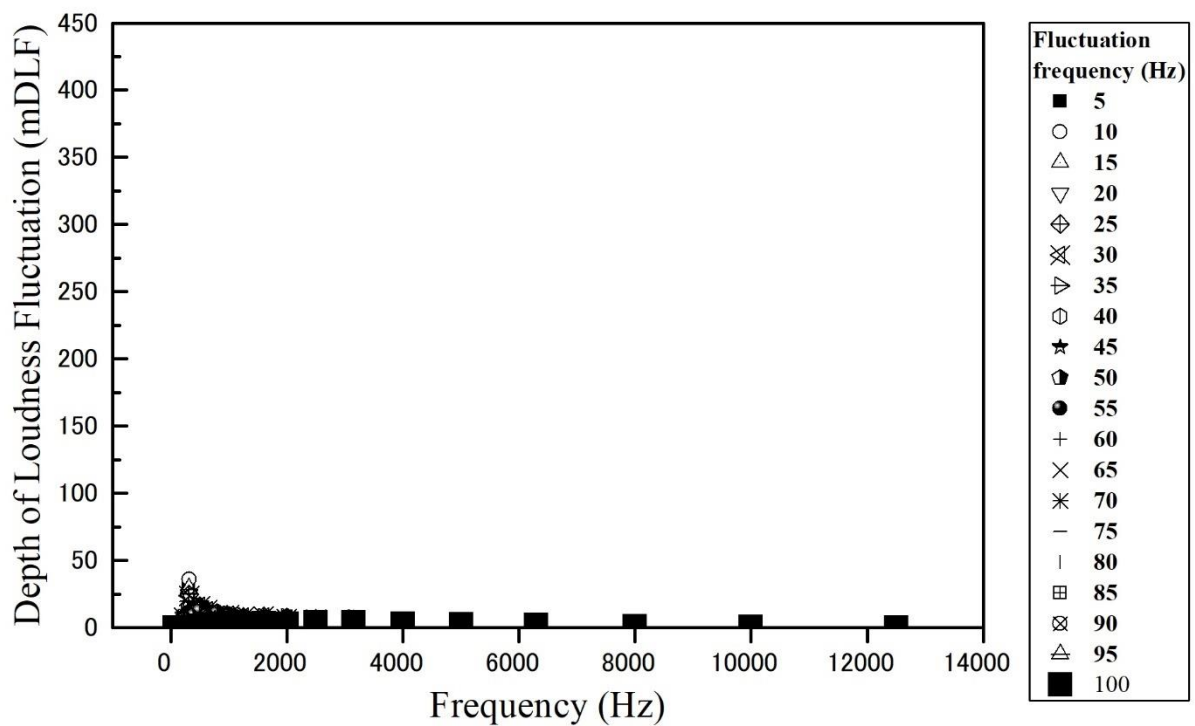


図 3.54 アクリル管における気泡流の変動音解析結果 ($j_l^* = 0.431$ $j_g^* = 0.013$)

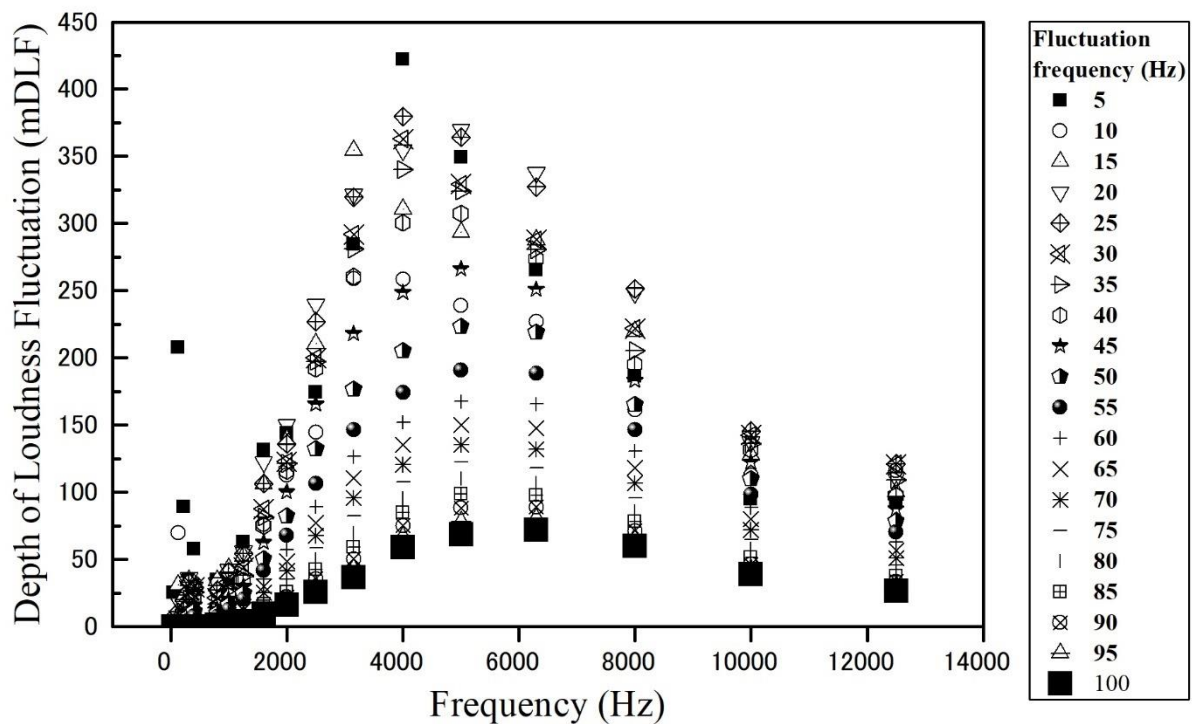


図 3.55 アクリル管におけるスラグ流の変動音解析結果 ($j_1^* = 0.431$ $j_g^* = 0.053$)

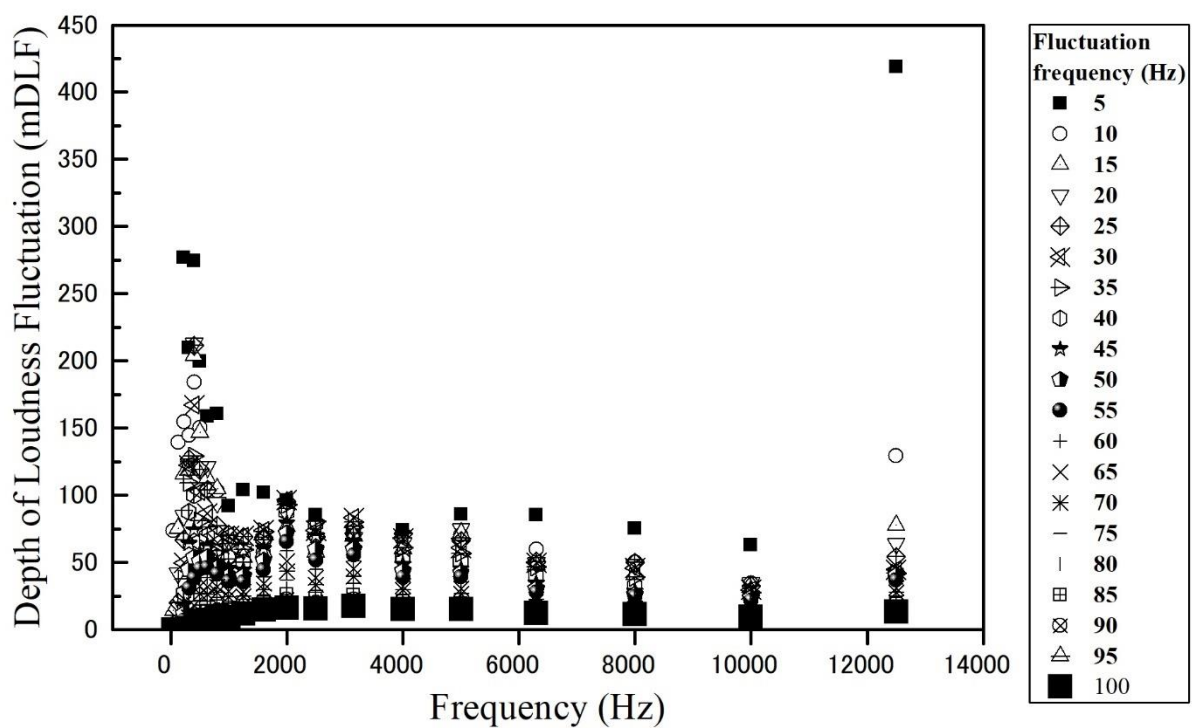


図 3.56 アクリル管におけるチャーン流の変動音解析結果 ($j_1^* = 0.431$ $j_g^* = 0.262$)

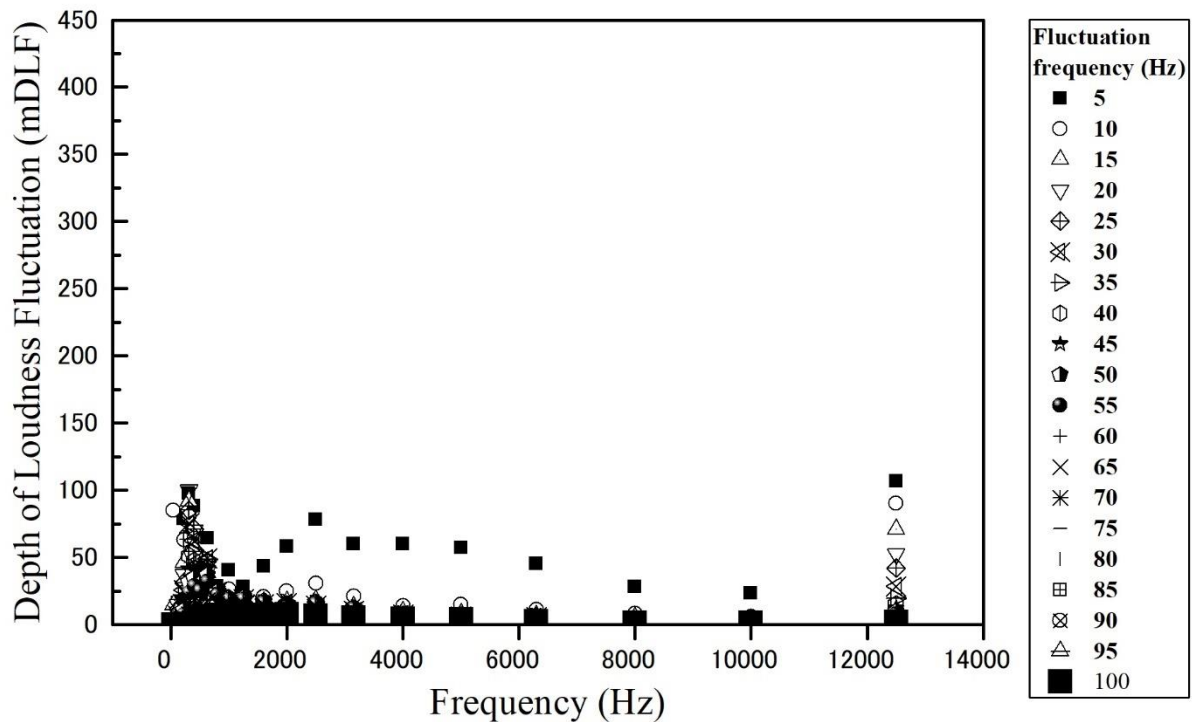


図 3.57 アクリル管における環状流の変動音解析結果 ($j_l^* = 0.431$ $j_g^* = 2.84$)

人間の耳は 2000Hz～4000Hz に対して最も感度が良いことが知られている。またこれらの変動音解析の結果より、mDLF の値が大きく表れた周波数は 4000Hz であり、比較的低変動周波数において DLF の値が大きく出やすい傾向がある事が伺える。

この結果を元に周波数を 4000Hz、水流量を一定とし、空気流量を増やしていった場合の変動音の変化を調べた。まず鋼管での結果について、グラフを正面から見たものを図 3.58, 3.60, 3.62, 3.64, 3.66, 背面から見たものを図 3.59, 3.61, 3.63, 3.65, 3.67 に示す。

解析結果の図は左側の横軸が変動周波数、右側の横軸が無次元空気見かけ流速、縦軸が変動の大きさ mDLF を表しており、無次元空気見かけ流速は手前から奥の方向へと増加してゆく順に並べてある。

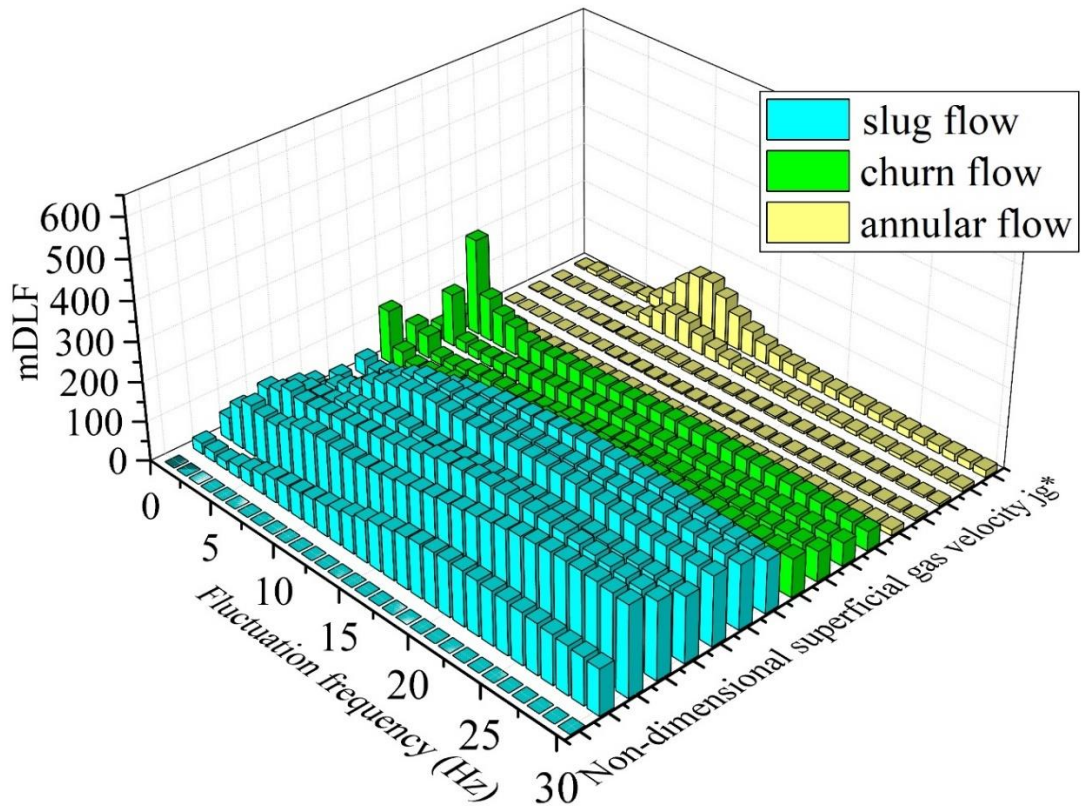


図 3.58 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）($j_{l^*} = 0.229$)

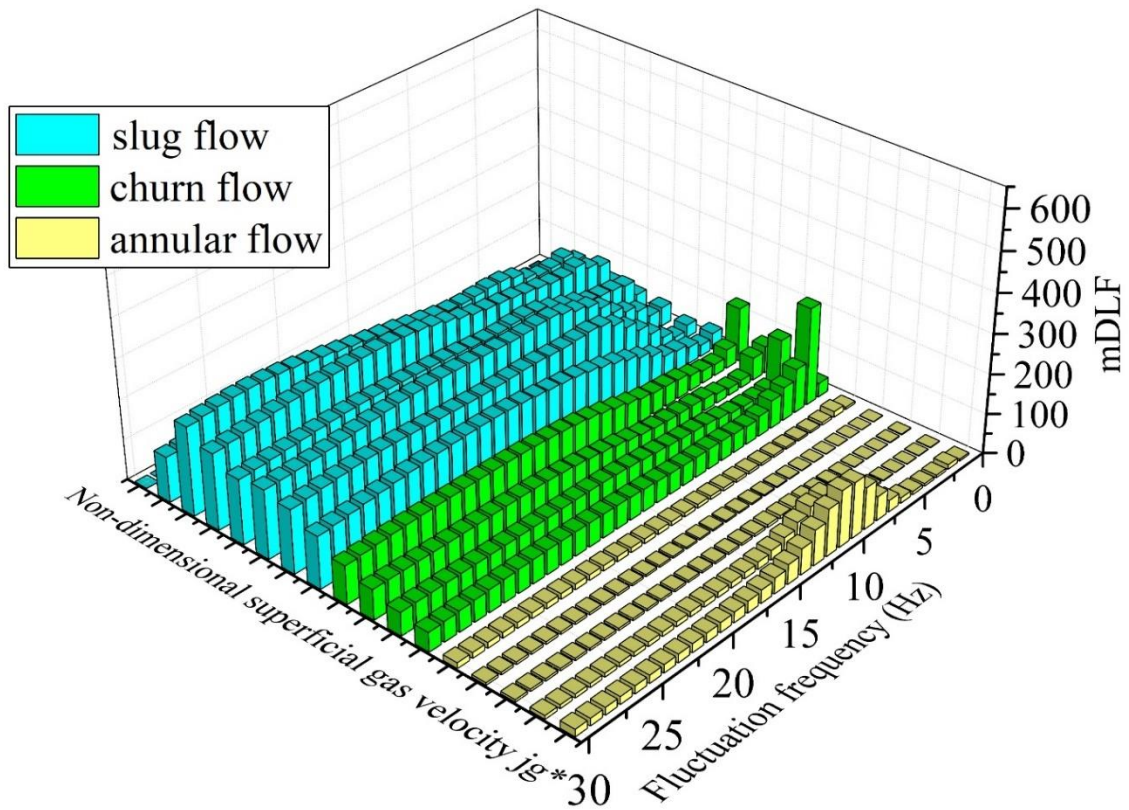


図 3.59 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）($j_{l^*} = 0.229$)

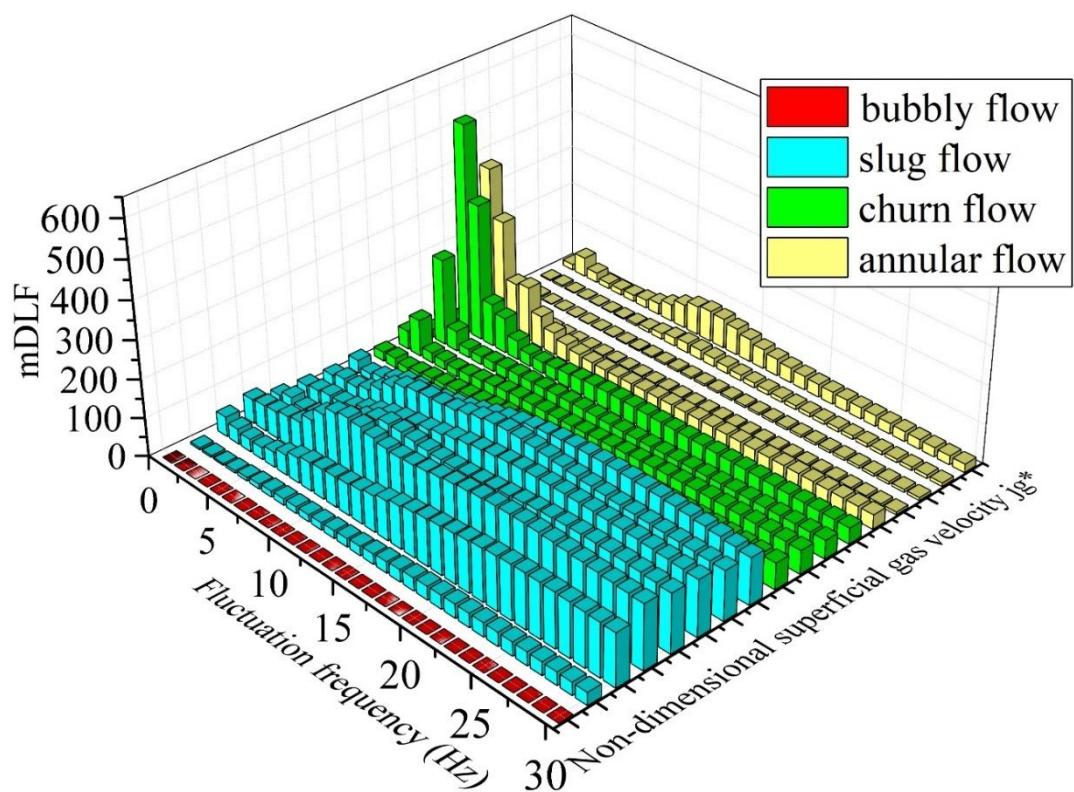


図 3.60 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）($j_1^* = 0.457$)

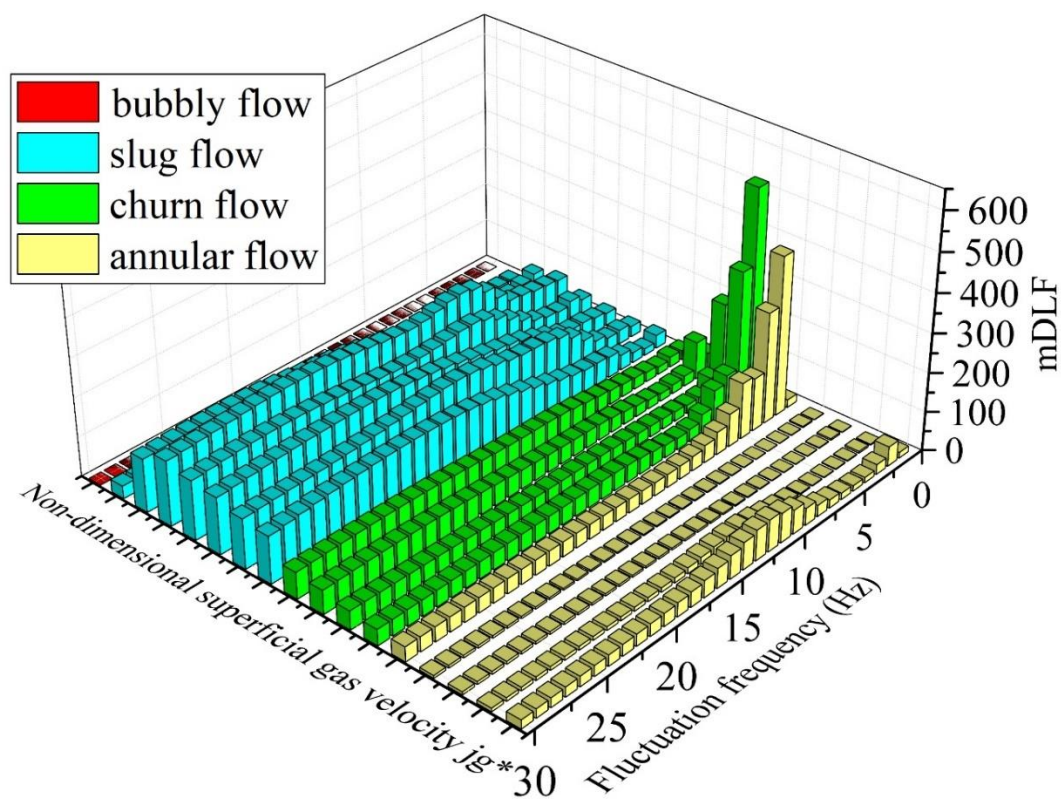


図 3.61 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）($j_1^* = 0.457$)

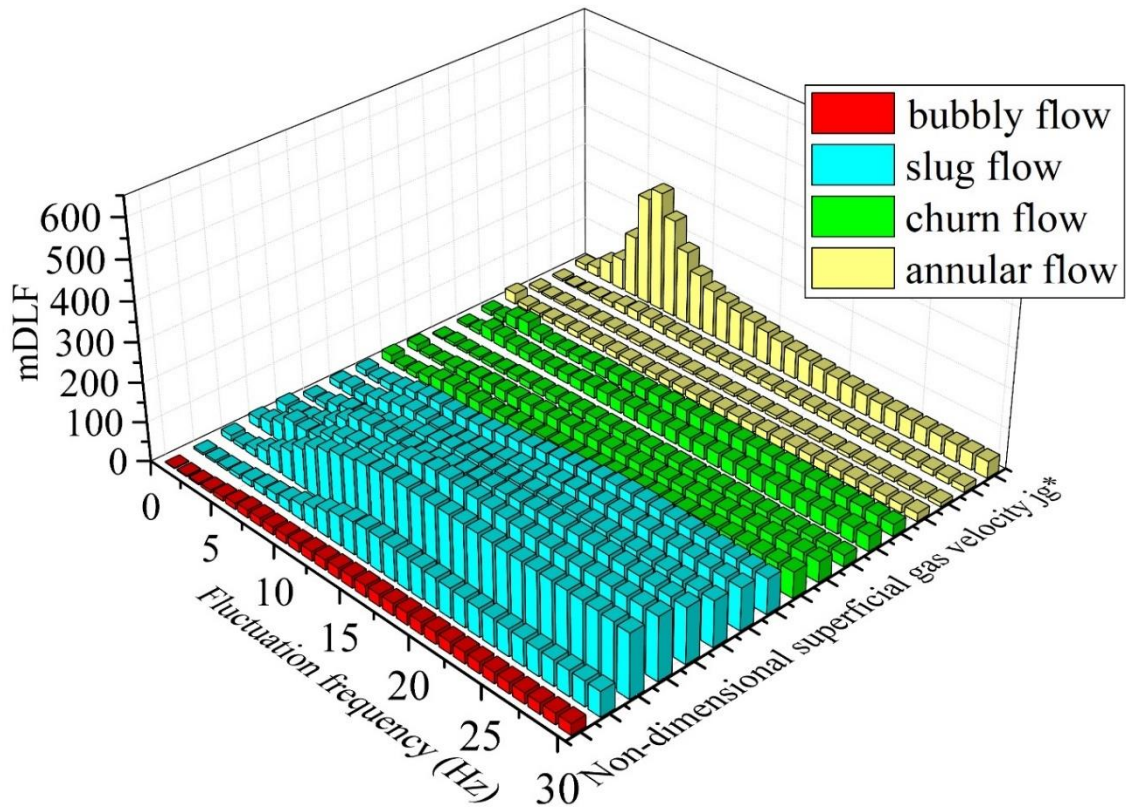


図 3.62 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）($j_1^* = 0.918$)

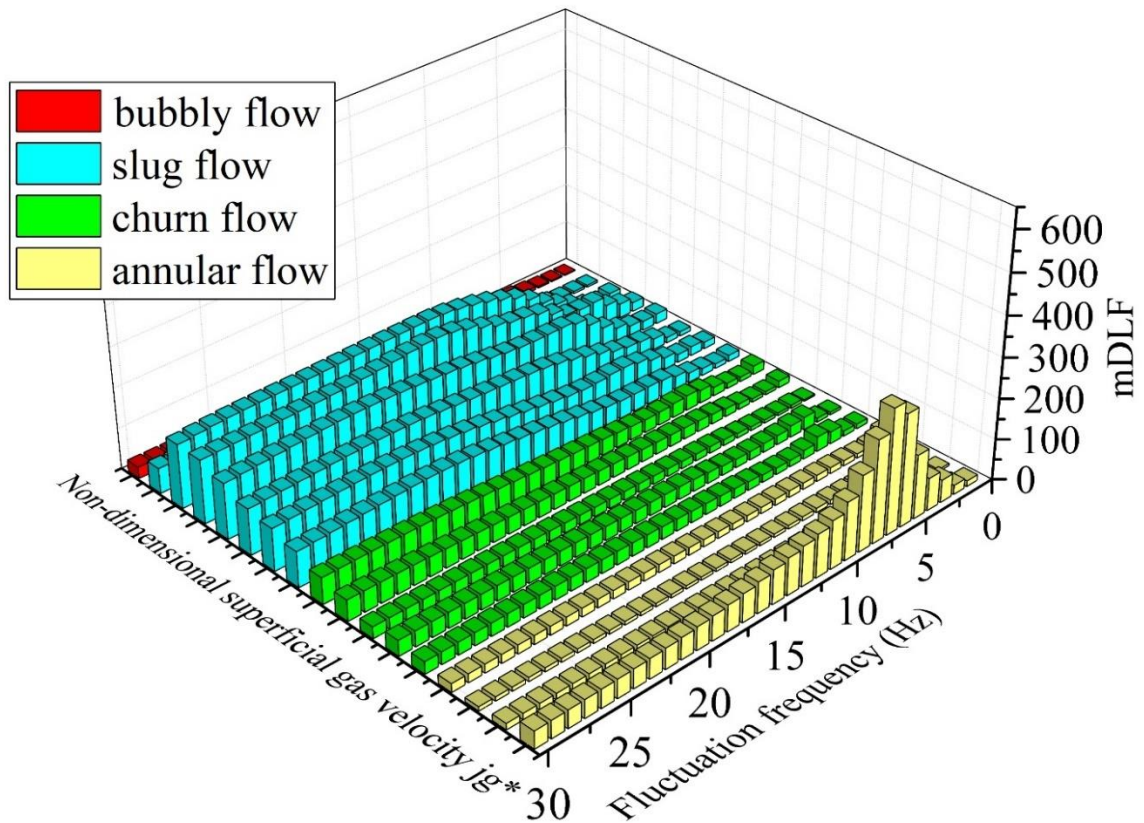


図 3.63 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）($j_1^* = 0.918$)

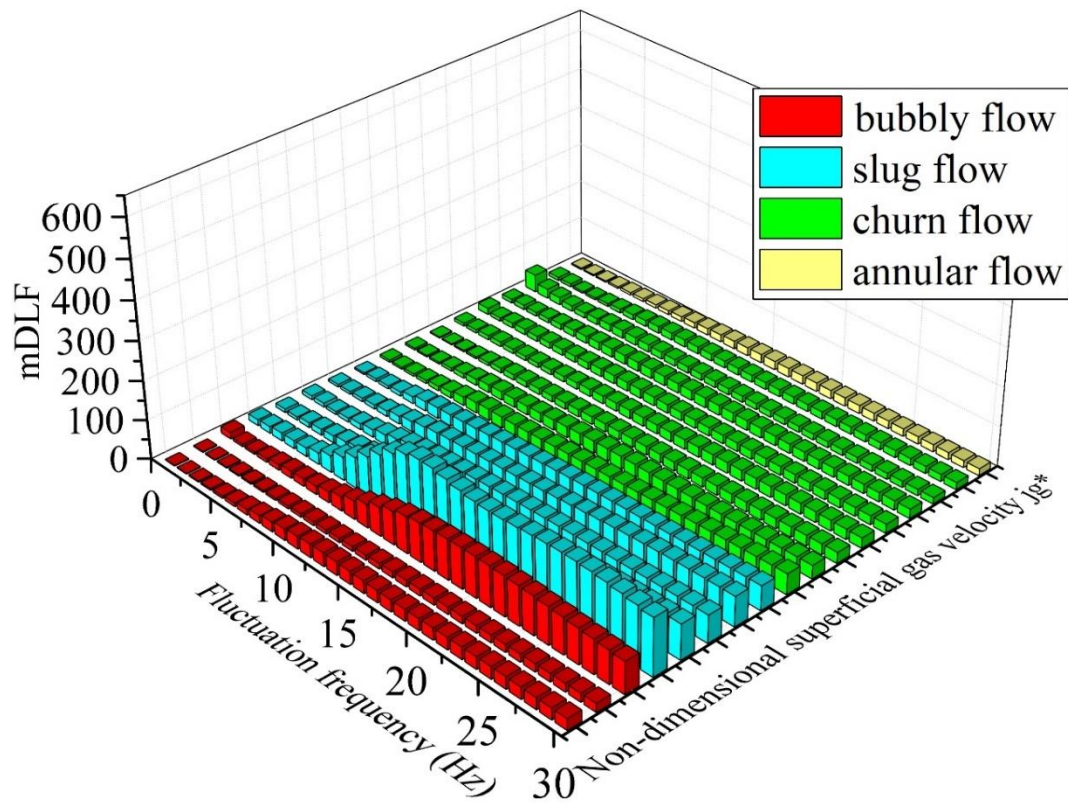


図 3.64 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）($j_1^* = 2.296$)

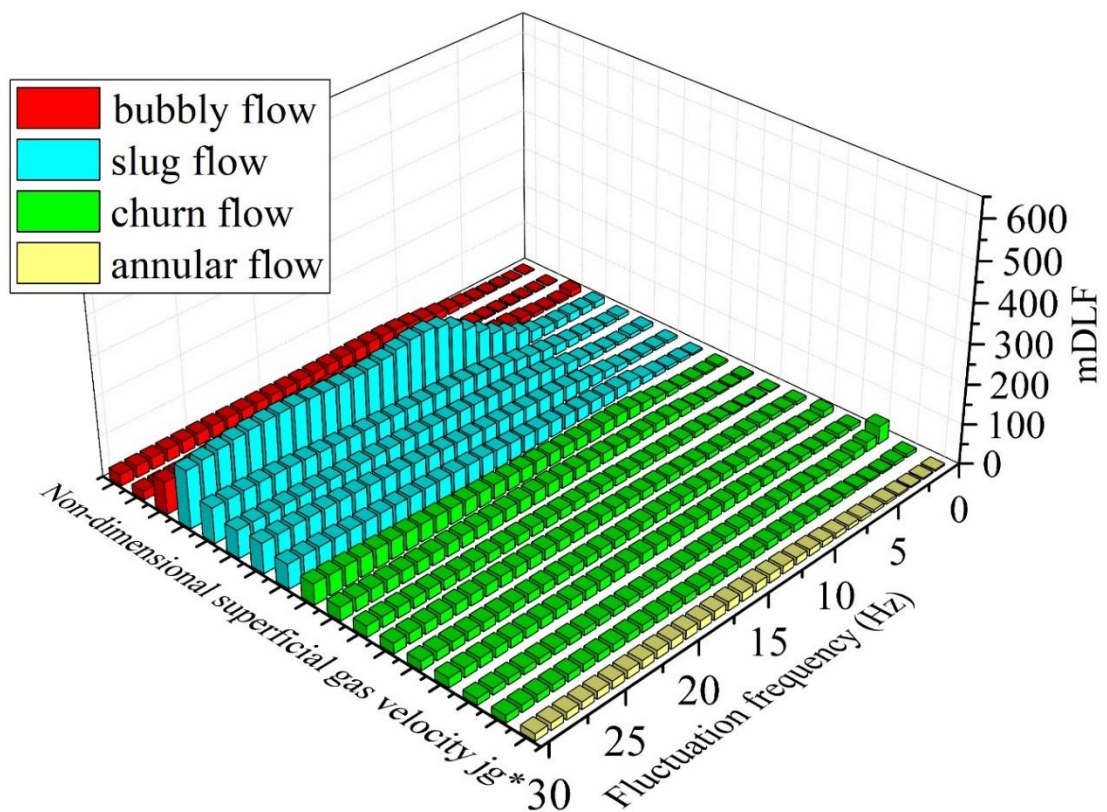


図 3.65 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）($j_1^* = 2.296$)

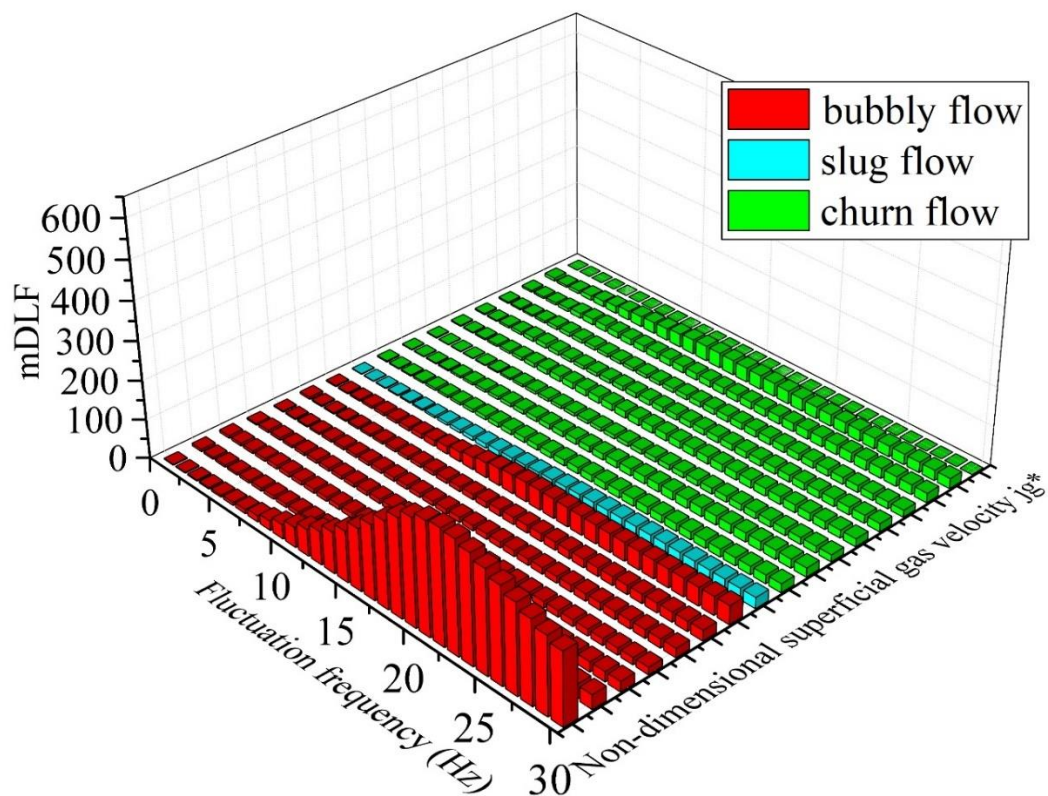


図 3.66 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）($j_1^* = 4.6$)

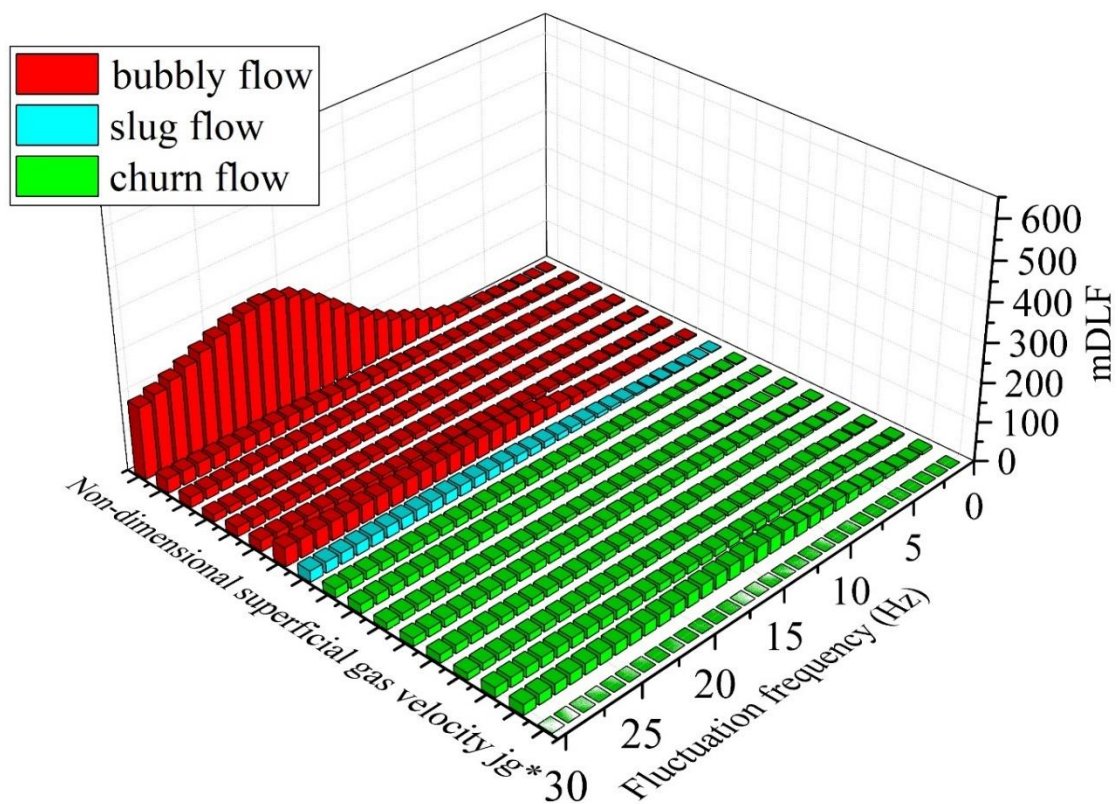


図 3.67 鋼管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）($j_1^* = 4.6$)

$j_1^* = 0.457$ での空気流量の増加に伴う各流動様式の変動音のスペクトルの変化は以下のようになる (図 3.60, 3.61).

気泡流ではスペクトルの山は見られない.

スラグ流では, 気泡流と比較し, 非常に大きなスペクトルの山がみられる. このスペクトルは変動周波数が 6Hz~30Hz で大きな値をとり, 無次元見かけ空気流速の増加に伴い, 減少してゆく.

チャーン流では, まずスペクトルは空気流量の増加に伴って減少し, スペクトルの山は見られなくなる. さらに空気流量を増加させると, 環状流遷移の直前で変動周波数 1~5Hz に 600mDLF を超える非常に大きなスペクトルのピークが現れる.

環状流では, 流動様式が遷移して間もない空気流量では, チャーン流同様に 1Hz~5Hz に非常に大きなピークが見られる. さらに空気流量が増加すると, 全体的にスペクトルが小さくなり, スペクトルの山は見られなくなる. これらの気泡流からスラグ流, チャーン流から環状流への遷移の傾向は $j_1^* = 0.229$ においても同様に見られた (図 3.58, 3.59).

$j_1^* = 0.918 \sim 2.296$ では気泡流からスラグ流での遷移では同じ傾向となるが, チャーン流から環状流への遷移域で見られていた変動周波数 1~5Hz はピークが見られなくなった (図 3.54, 3.55, 3.56, 3.57).

$j_1^* = 4.3$ では流動様式はチャーン流までしか再現できないが, これまでの傾向とは異なり, 気泡流領域で大きなスペクトルが確認された (図 3.66, 3.67). これは, 3.2 項の可視化実験結果での結果の図 3.3, 3.4 から分かるように, 同じ気泡流と判定していても実際の流動の様子が異なるためだと考えられる.

これらの結果より, 変動音解析では水流量が小さい場合において, 気泡流からスラグ流, チャーン流から環状流への遷移が判定できると思われる.

次にアクリル管での解析結果についてグラフを正面から見たものを図 3.68, 3.70, 3.72, 3.74, 3.76, 背面から見たものを図 3.69, 3.71, 3.73, 3.75, 3.77 に示す.

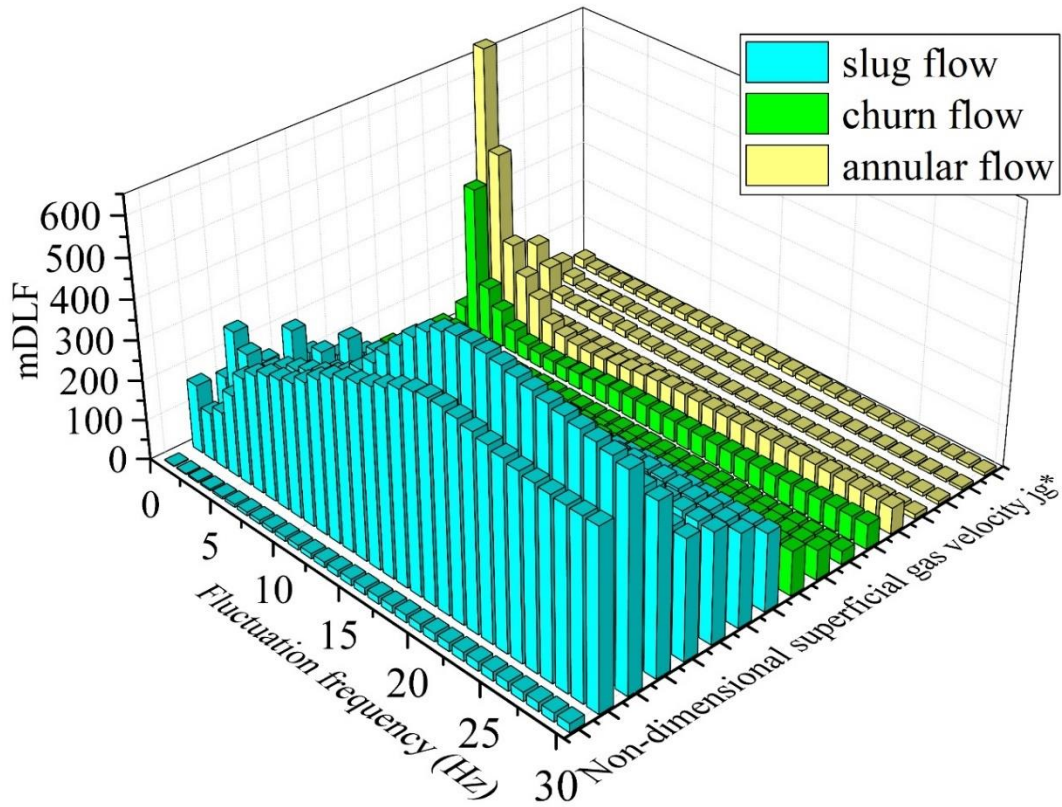


図 3.68 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）
($j_1^* = 0.215$)

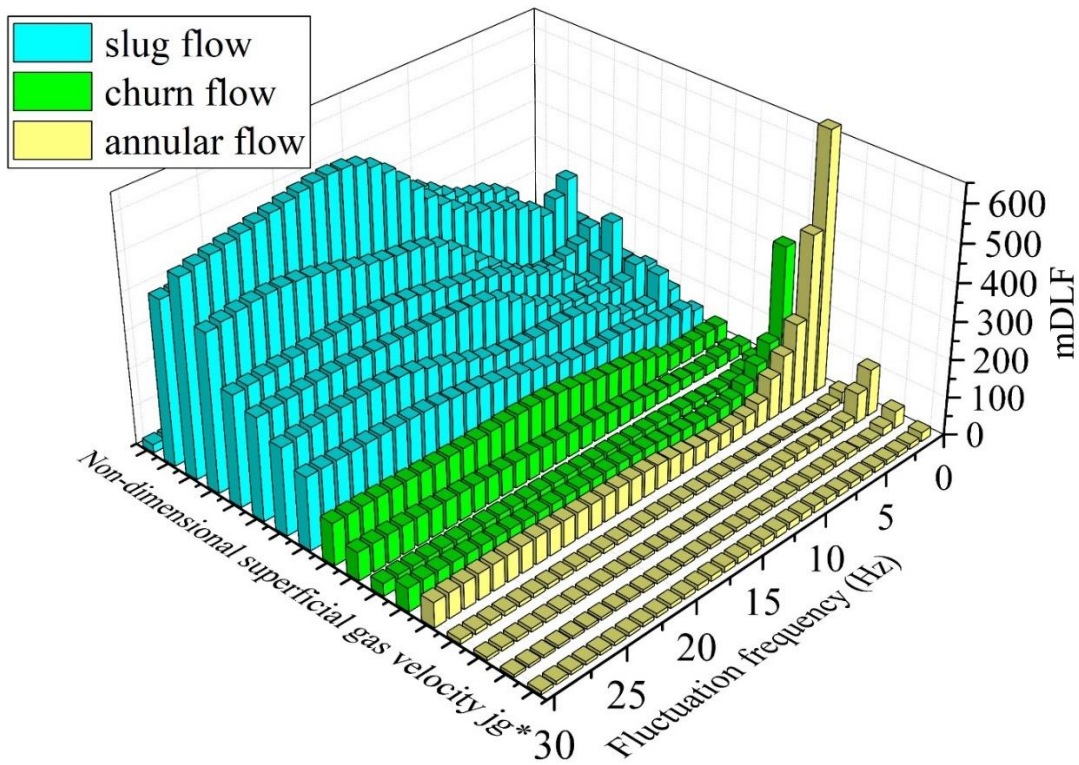


図 3.69 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）
($j_1^* = 0.215$)

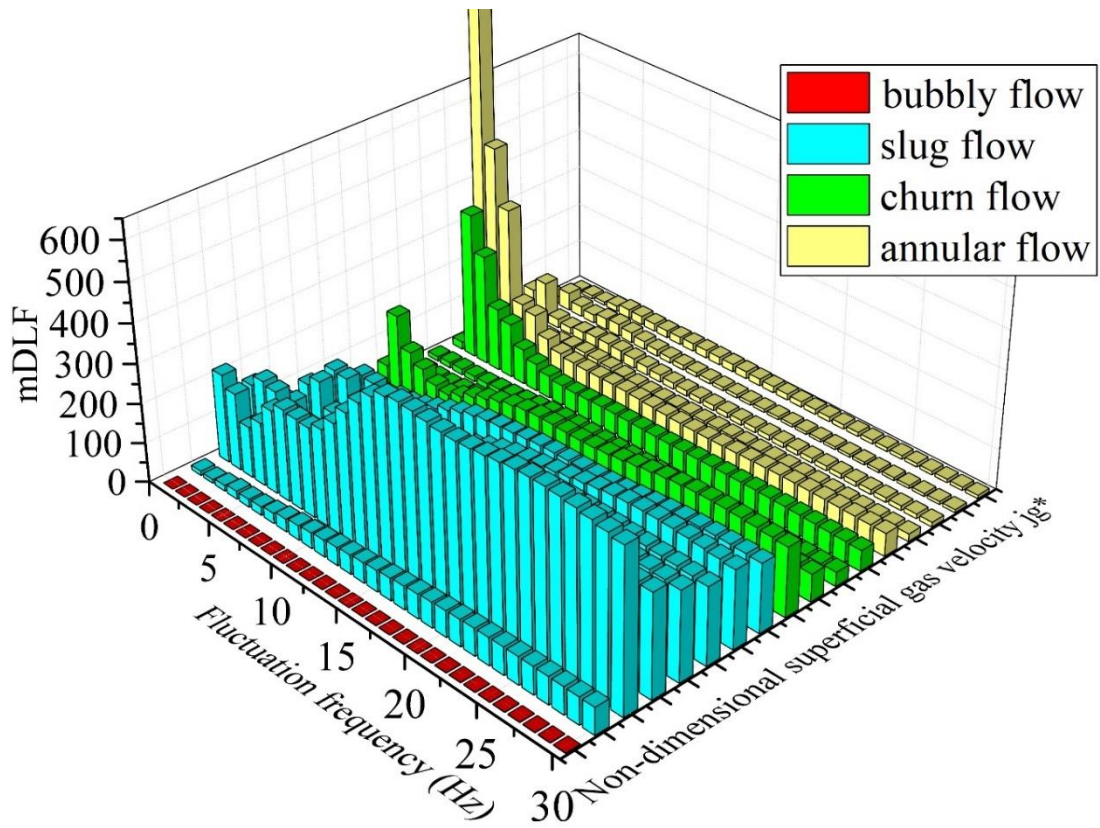


図 3.70 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）
($j_1^* = 0.431$)

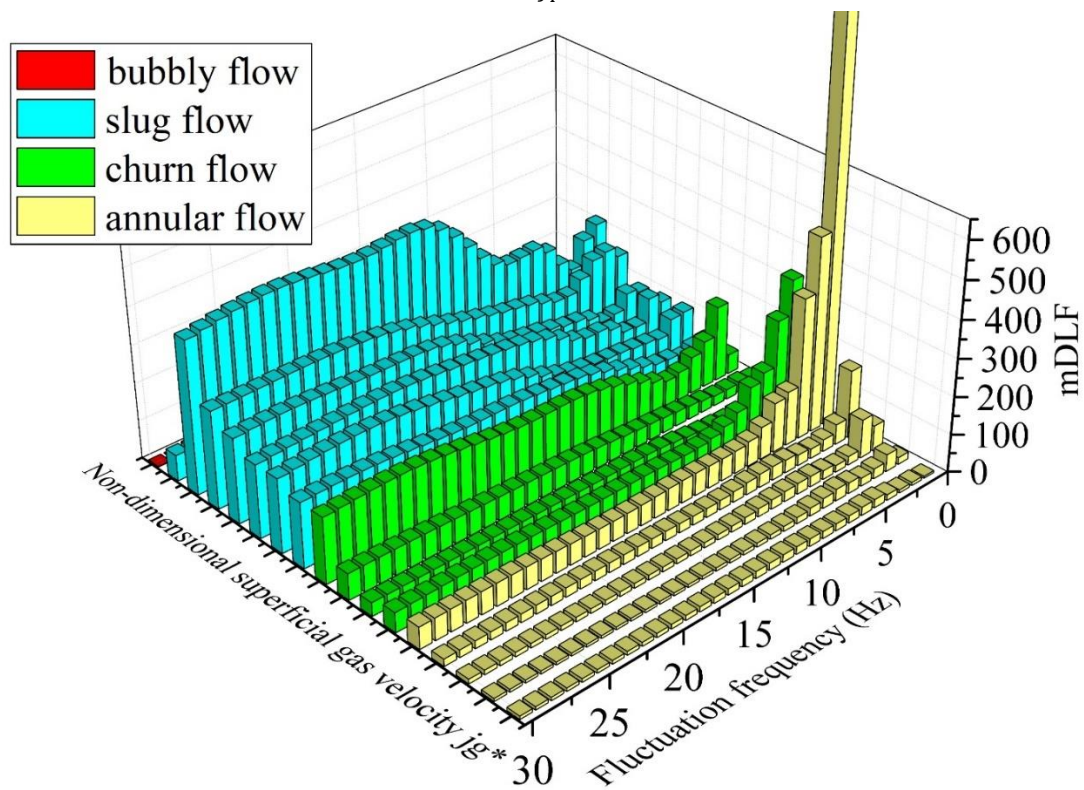


図 3.71 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）
($j_1^* = 0.431$)

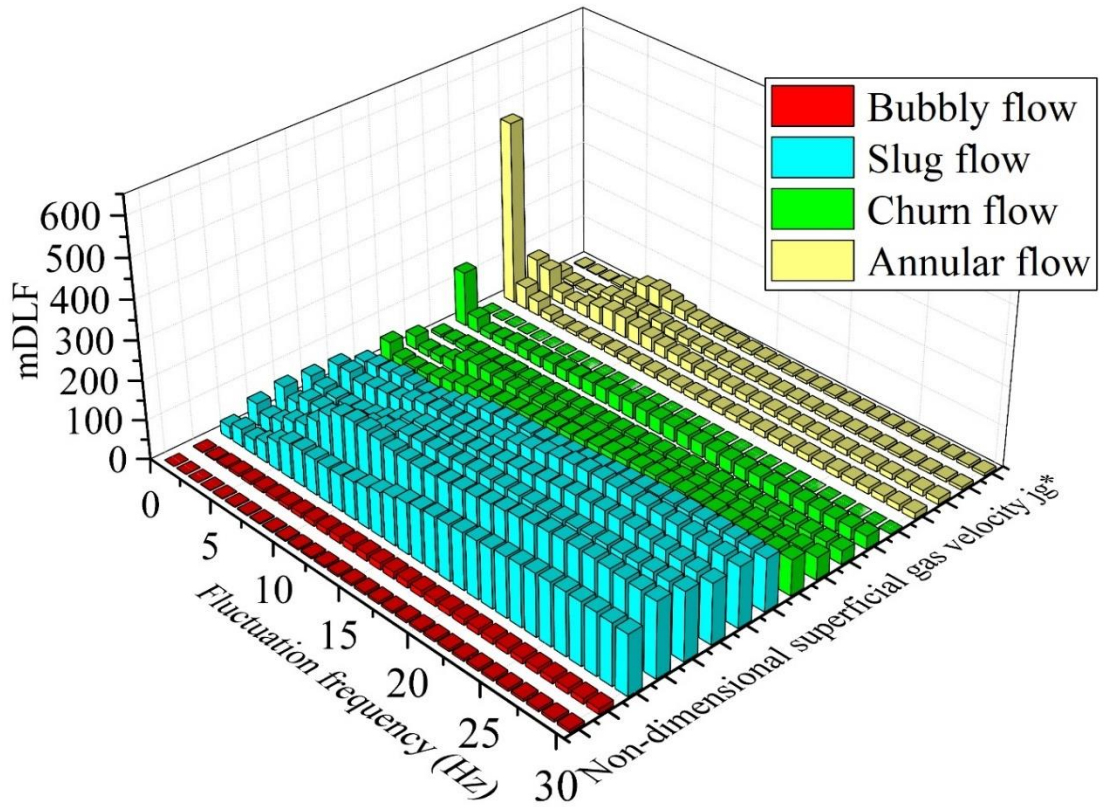


図 3.72 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）
 $(j_1^* = 0.861)$

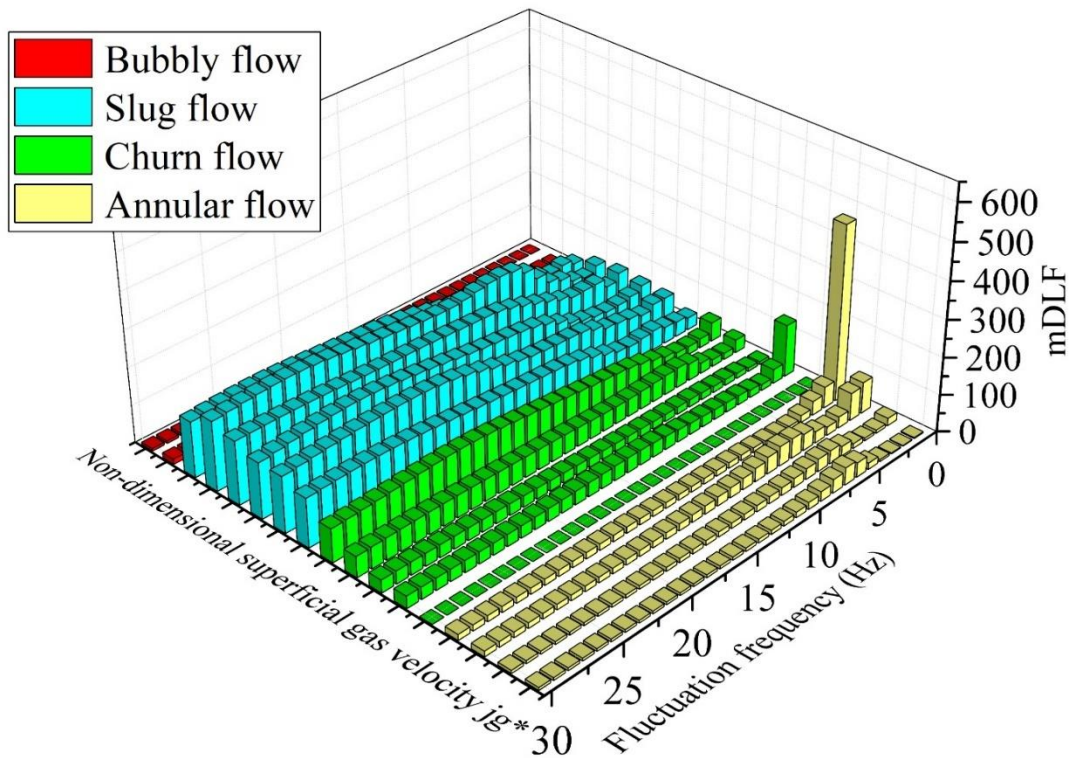


図 3.73 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）
 $(j_1^* = 0.861)$

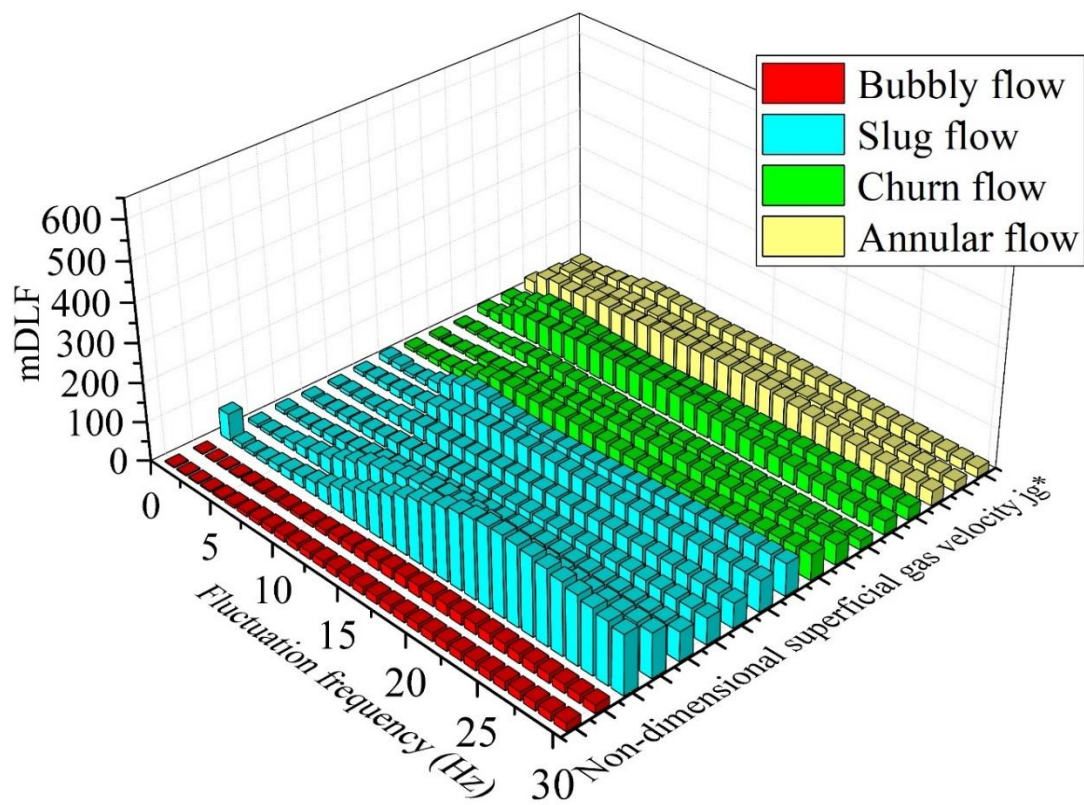


図 3.74 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）
 $(j_{l*} = 2.153)$

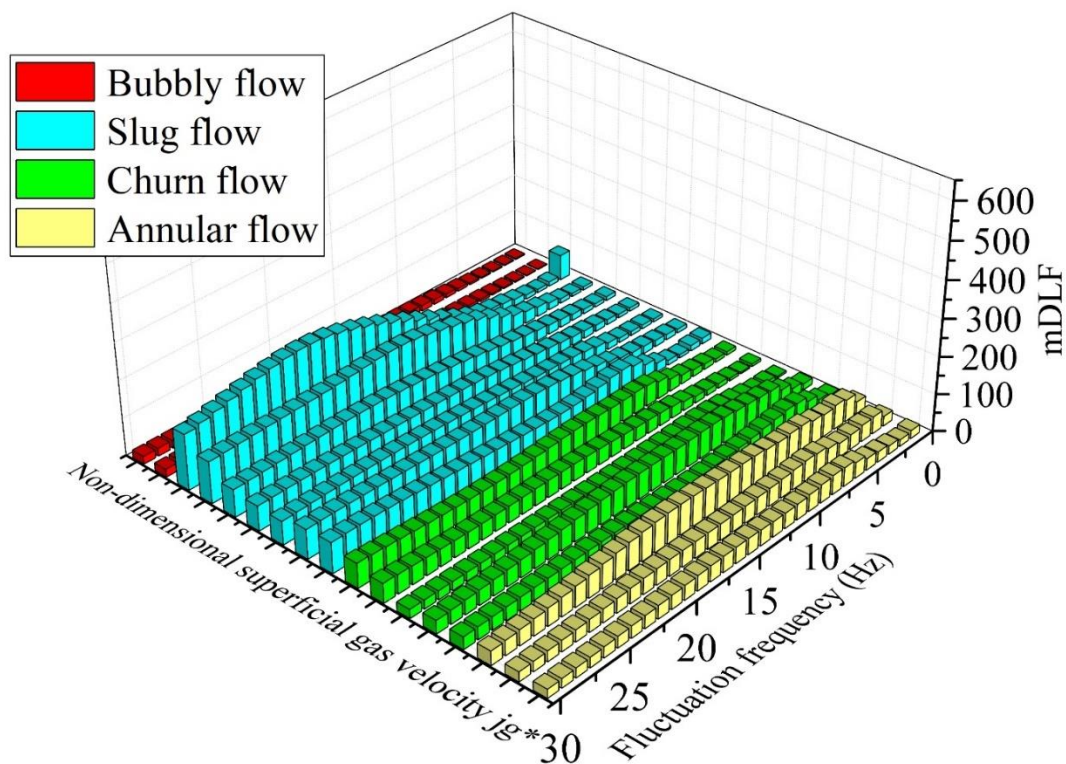


図 3.75 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）
 $(j_{l*} = 2.153)$

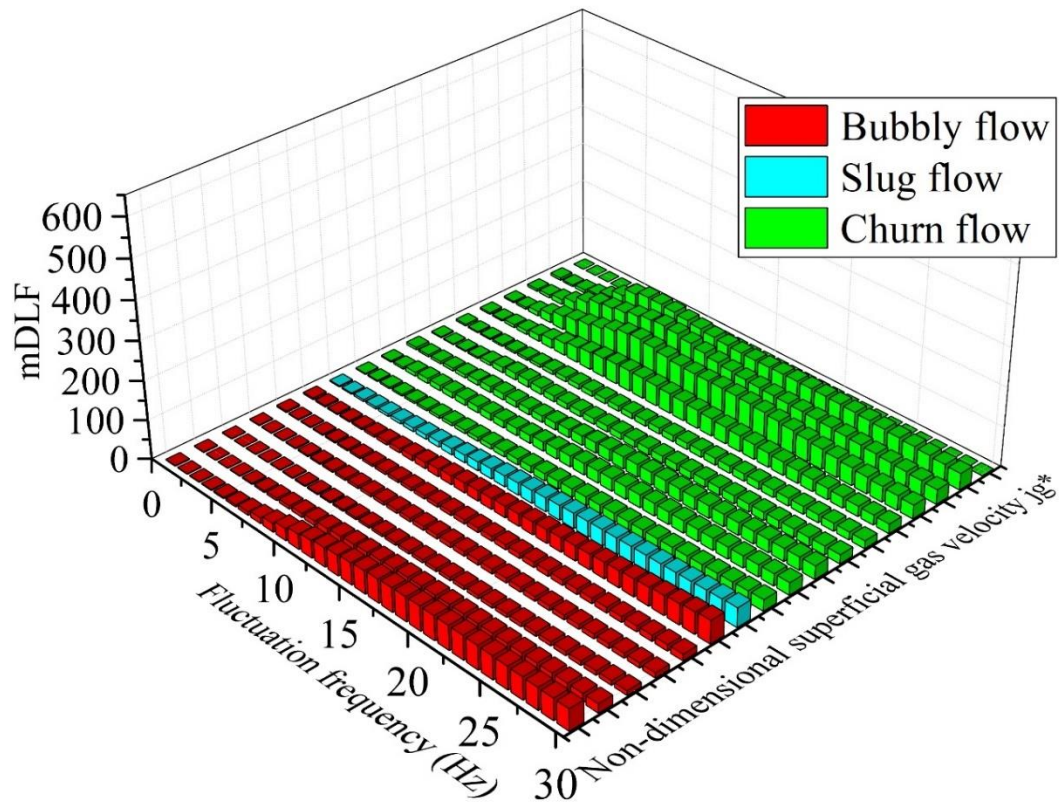


図 3.76 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（正面）
 $(j_1^* = 4.3)$

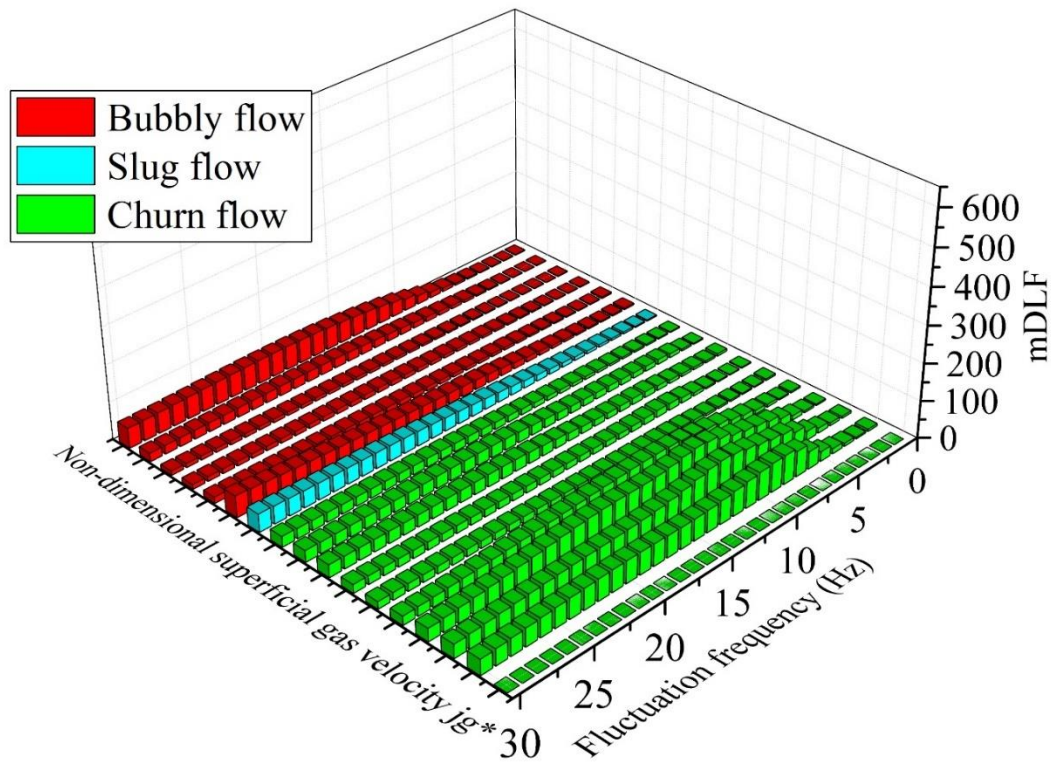


図 3.77 アクリル管における無次元空気見かけ速度の変化による変動音成分の変化（背面）
 $(j_1^* = 4.3)$

アクリル管において、鋼管 $j_1^* = 0.229 \sim 0.457$ において見られた、気泡流からスラグ流、チェーン流から環状流への遷移の傾向は $j_1^* = 0.215 \sim 0.861$ で同様に見られた (図 3.68, 3.69, 3.70, 3.71, 3.72, 3.73)。

$j_1^* = 2.153 \sim 4.3$ では、鋼管の高流量域と同様に遷移の傾向は見られなくなった (図 3.74, 3.75, 3.76, 3.77)。

これらの結果を踏まえて、水流量を固定して、変動周波数 1~5Hz と 6Hz~30Hz の平均値を無次元みかけ空気流速 j_g^* で整理した鋼管での結果を図 (3.78, 3.79, 3.80, 3.81, 3.82), アクリル管での結果を図 (3.83, 3.84, 3.85, 3.86, 3.87) に示す。

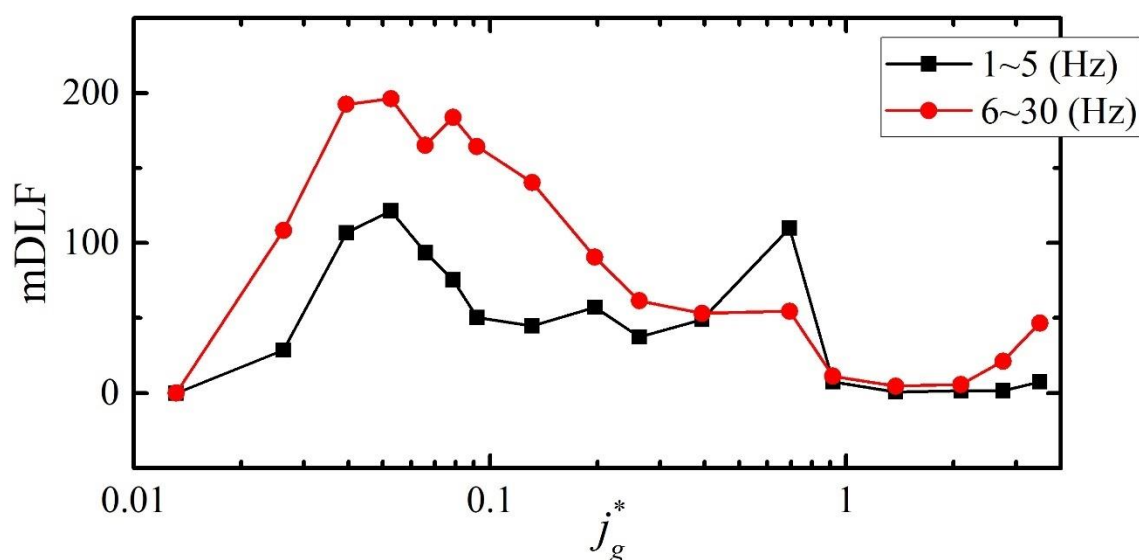


図 3.78 鋼管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化 ($j_1^* = 0.229$)

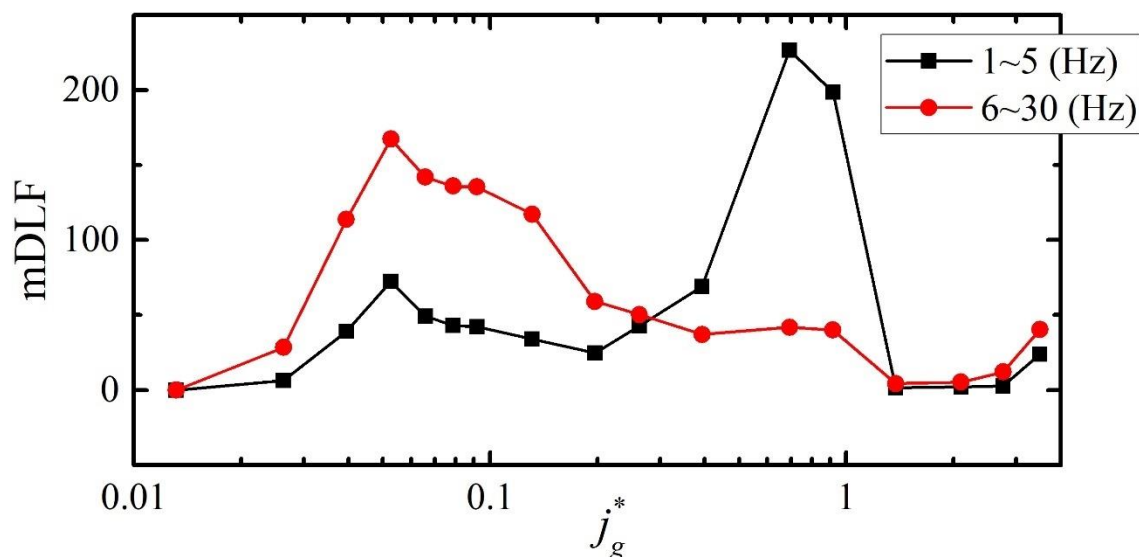


図 3.79 鋼管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化 ($j_1^* = 0.457$)

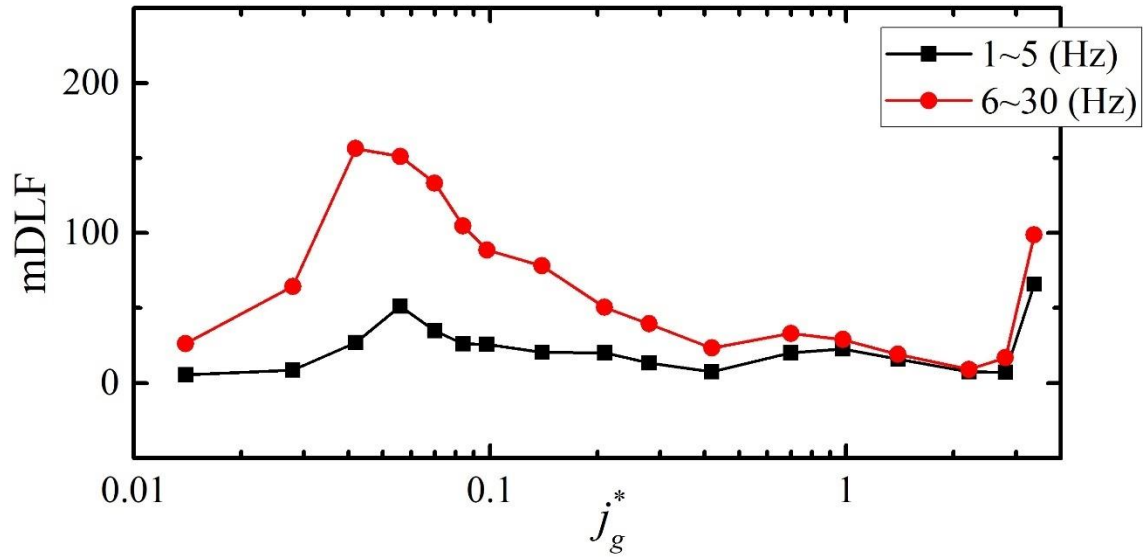


図 3.80 鋼管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化 ($j_1^* = 0.918$)

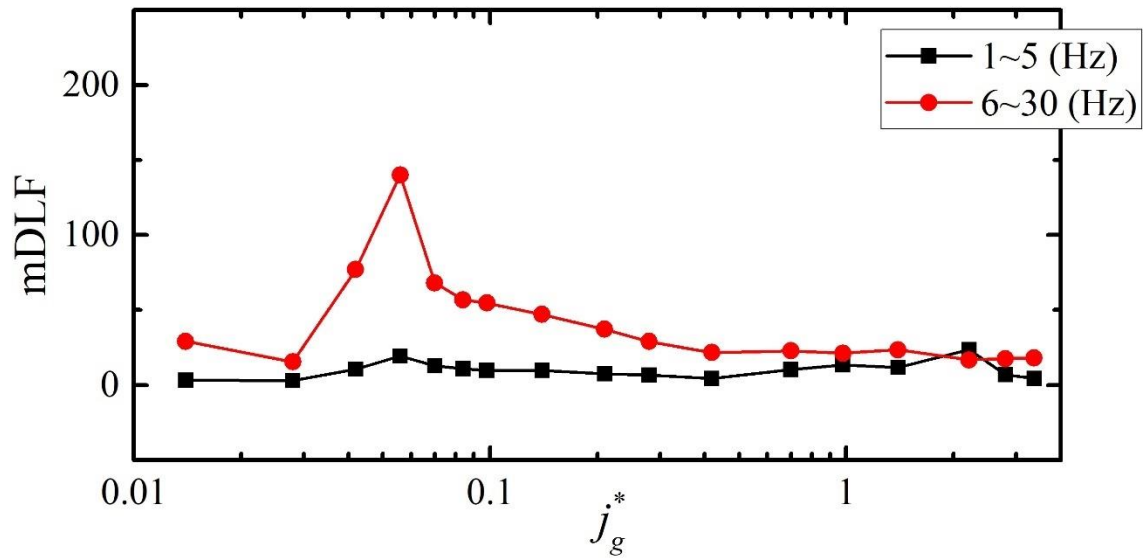


図 3.81 鋼管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化 ($j_1^* = 2.296$)

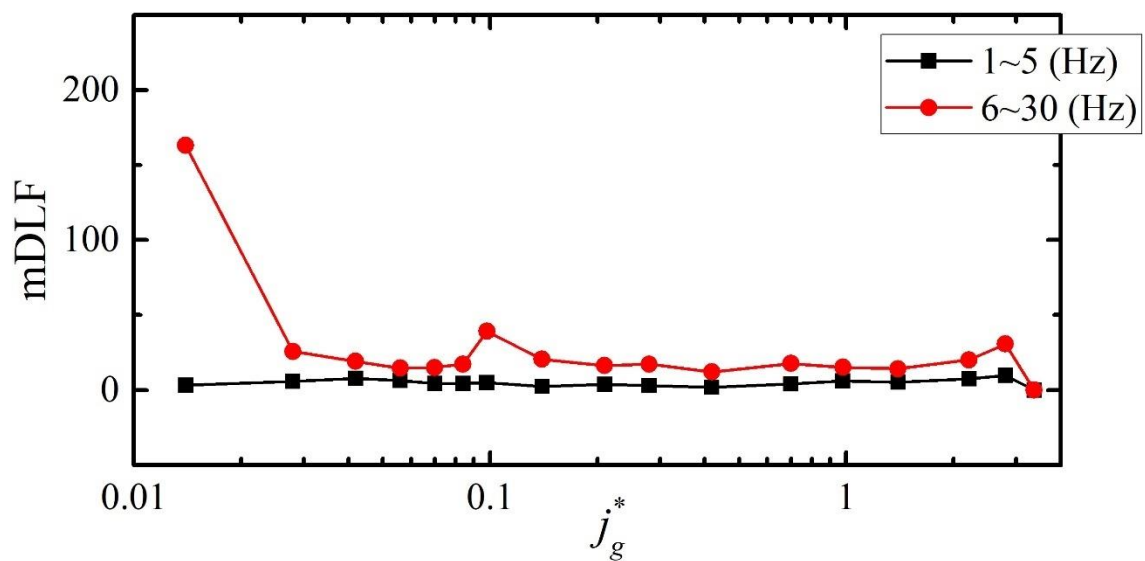


図 3.82 鋼管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化 ($j_1^* = 4.6$)

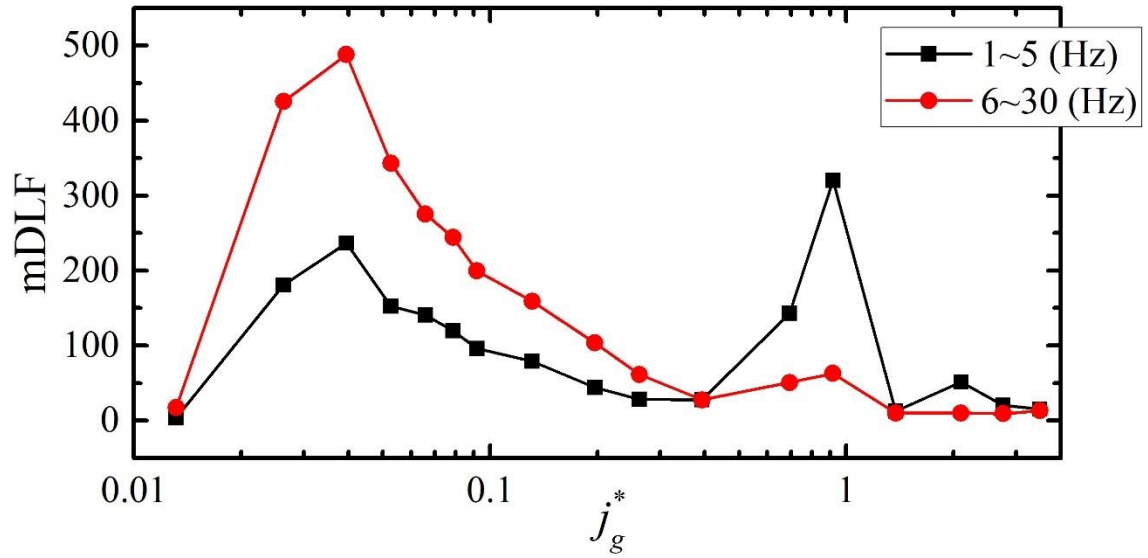


図 3.83 アクリル管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化
($j_1^* = 0.215$)

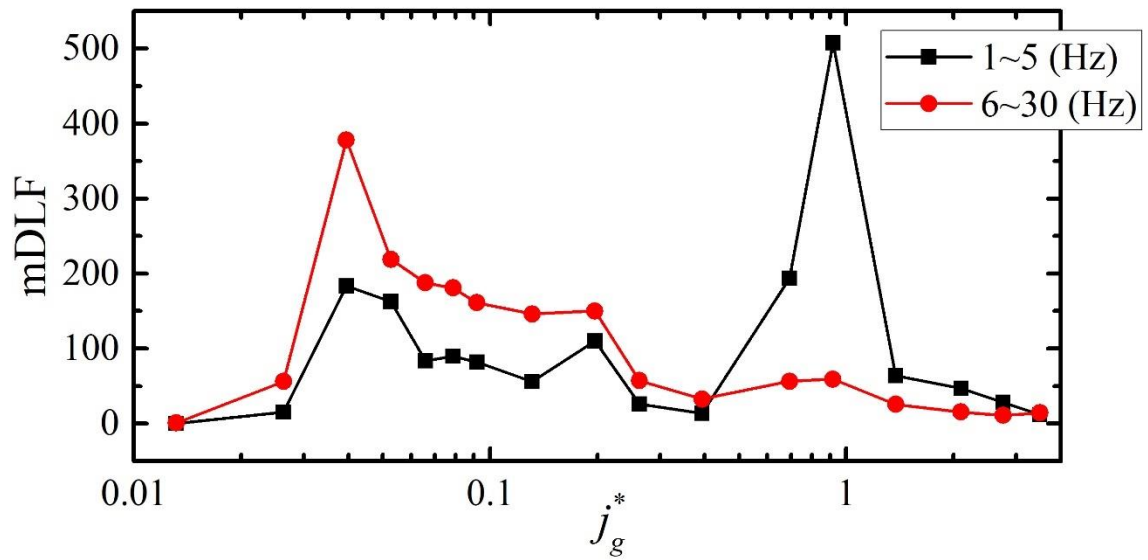


図 3.84 アクリル管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化
($j_1^* = 0.431$)

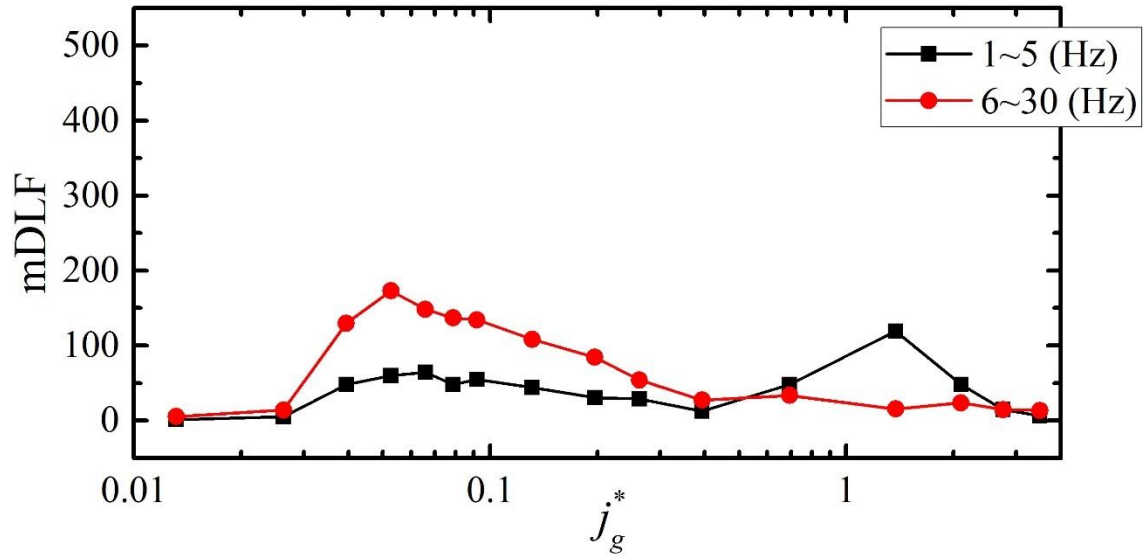


図 3.85 アクリル管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化
($j_1^* = 0.861$)

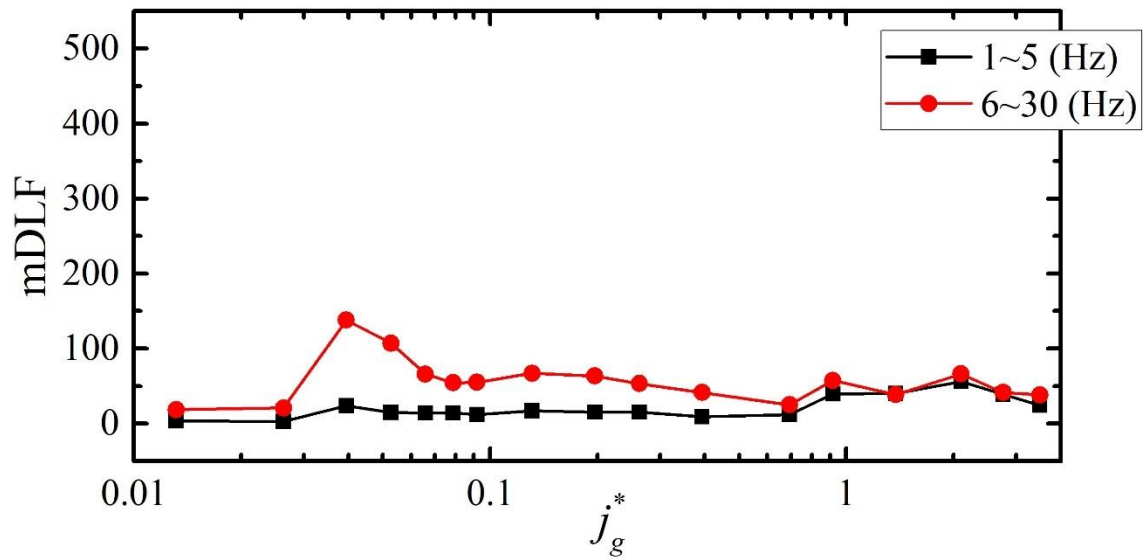


図 3.86 アクリル管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化
($j_1^* = 2.153$)

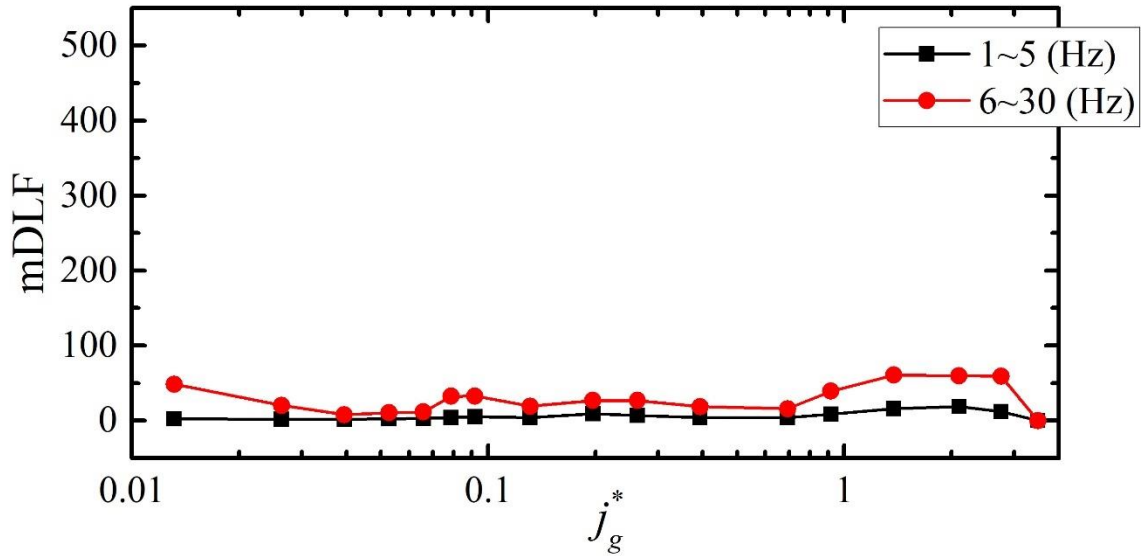


図 3.87 アクリル管における無次元みかけ空気流速を変化させた変動音の平均値の変化
($j_l^* = 4.3$)

まず，鋼管 $j_l^* = 0.457$ の結果について注目する（図 3.79）．6～30Hz の平均値について $j_g^* = 0.056$ で極大値をとる．この時，流動様式は，気泡流からスラグ流へと遷移している．また，1～5Hz の平均値は $j_g^* = 0.70$ において6～30Hz の平均値を上回ってピークをとる．この時，流動様式は，チャーン流から環状流へと遷移している．以上の結果より，気泡流からスラグ流，チャーン流から環状流への遷移は，それぞれ変動周波数 6～30Hz，1～5Hz の平均値のピークに着目することによって判別することが出来る．

このスラグ流への遷移判定は鋼管では $j_l^* = 0.229 \sim 2.296$ アクリル管では $j_l^* = 0.215 \sim 2.153$ の範囲でしか確認されない．これは水流量が最も大きい時には図 3.12 の実験範囲と流動様式遷移線より，スラグ流が存在する領域はほとんどなく，可視化実験の結果の図 3.5 と図 3.6 より，スラグ流と判定されたとしても，水流量の違いによって液スラグ部や液膜中の気泡の様子が大きく異なるため，変動音解析がその変化の結果をとらえたためだと考えられる．

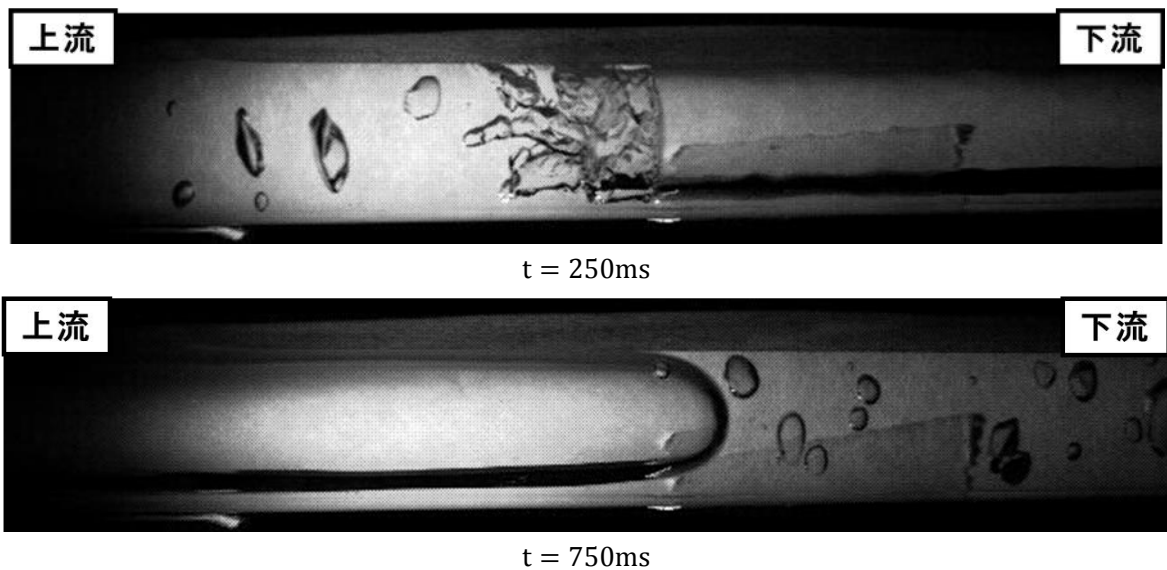
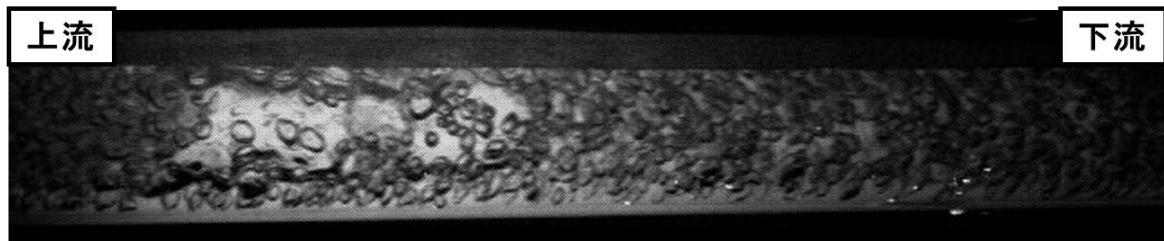
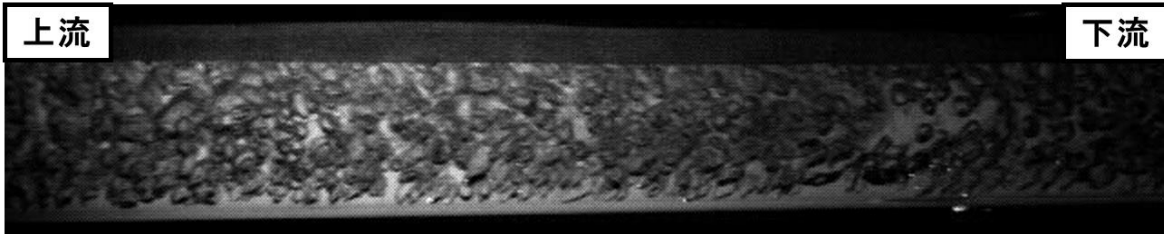


図 3.5 スラグ流（ $j_l^* = 0.431$, $j_g^* = 0.053$ ）



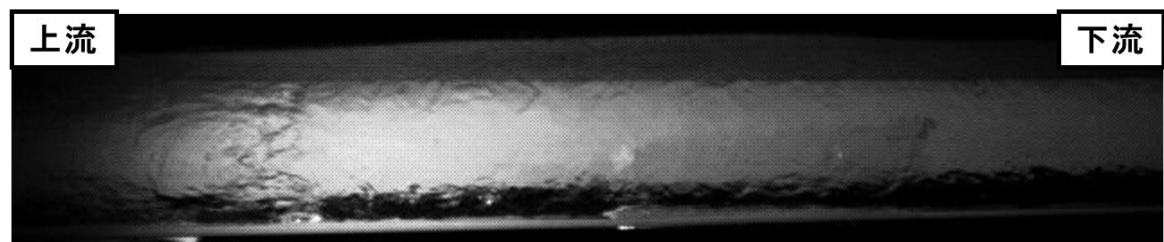
$t = 260\text{ms}$



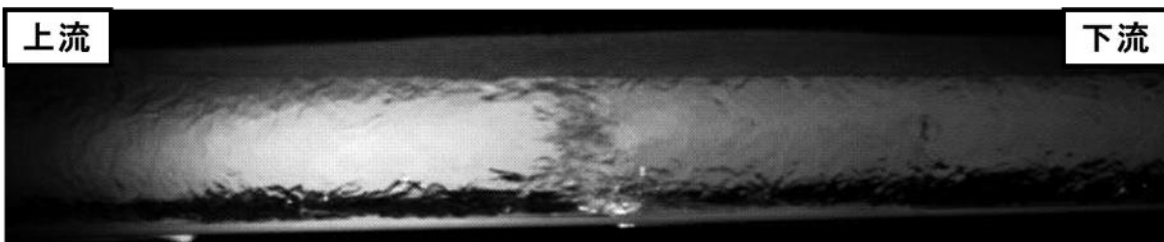
$t = 750\text{ms}$

図 3.6 スラグ流 ($j_l^* = 4.309$, $j_g^* = 0.092$)

また環状流への遷移判定は，鋼管では $j_l^* = 0.229 \sim 0.457$ ，アクリル管では $j_l^* = 0.215 \sim 0.861$ までしか確認されない．こちらでもスラグ流遷移と同様に，可視化実験の結果（図 3.9，3.10）より， $j_l^* = 2.153$ では気液界面は波立ち，液膜中には微小気泡が大量に混入している様子が見られる．これらの液膜中での様相の変化が，変動音として現れたために解析結果に違いが見られたと思われる．



$t = 250\text{ms}$



$t = 760\text{ms}$

図 3.9 環状流 ($j_l^* = 0.215$, $j_g^* = 3.28$)

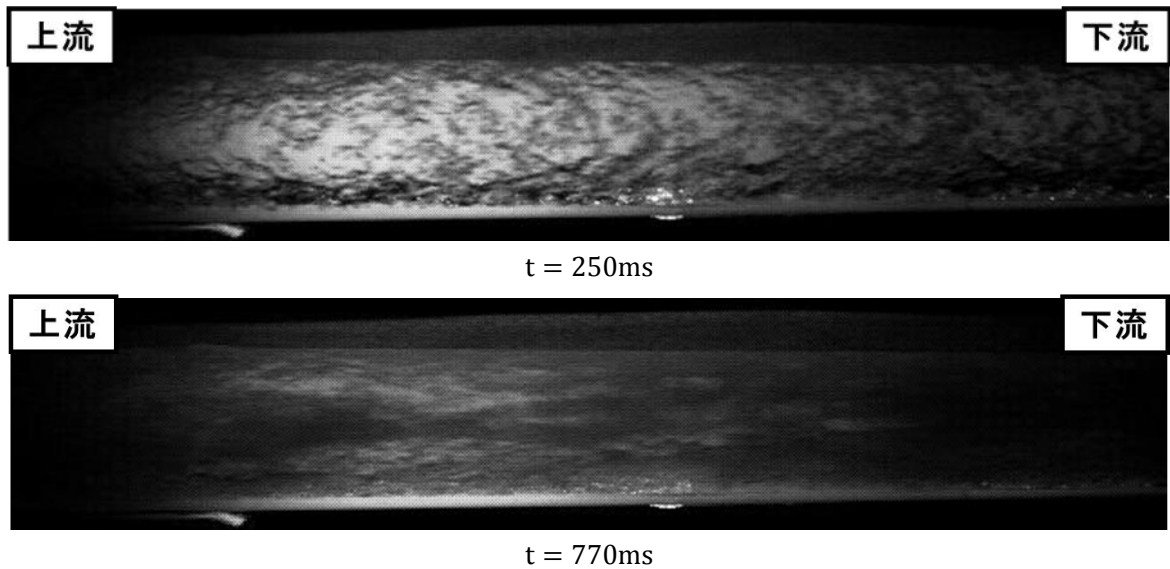


図 3.10 環状流 ($j_l^* = 2.155$, $j_g^* = 2.094$)

また，可視化実験にて確認された環状流での流動状態の違いについて式 (3.16) の刑部らの環状流遷移式を用いて考察する．

$$j_g^* = 0.412 \left[4 \frac{g}{g_0} + 5(j_l^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

刑部らは，環状流遷移がボイド率 $\alpha = 0.8$ で引き起こされるとし，気相および液相の運動方程式，気液界面せん断力および壁面せん断力の式より，無次元見かけ速度を用いた式 3.16 の環状流遷移条件式を導き，地上重力状態及び微小重力状態において良い結果を得ている [7]．

図 3.88 に本実験範囲と刑部らの環状流遷移式を示す．

この環状流遷移式 (式 3.16) の右辺第一項は重力項であり第二項はせん断応力項であると考えることが出来る．液相みかけ流速が比較的低い場合には右辺第 1 項の重力項支配となっており，液相みかけ流速に依らず遷移気相みかけ流速が決定される．また，液相みかけ流速が大きくなってくると，重力項に比べて第 2 項のせん断力項が大きくなり，遷移気相みかけ流速は液相みかけ流速と共に大きくなる．この傾向の境界としておよそ， $j_l^* = 0.9$ 付近で環状流遷移における支配的な力が変化すると考えられる．

変動音解析による環状流遷移の傾向は，アクリル管では $j_l^* = 0.861$ までは見られ， $j_l^* = 2.153$ 以降では見られなくなる．鋼管では $j_l^* = 0.457$ までは見られ， $j_l^* = 0.918$ 以降では見られなくなる．

これらの変動音解析の結果と刑部らの環状流遷移式より，鋼管とアクリル管では $j_l^* = 0.9$ 付近を境として環状流遷移の過程が異なり，その結果，可視化実験にて確認されたような流動状態の変化が起きたため，変動音に差が生じたと考えられる．

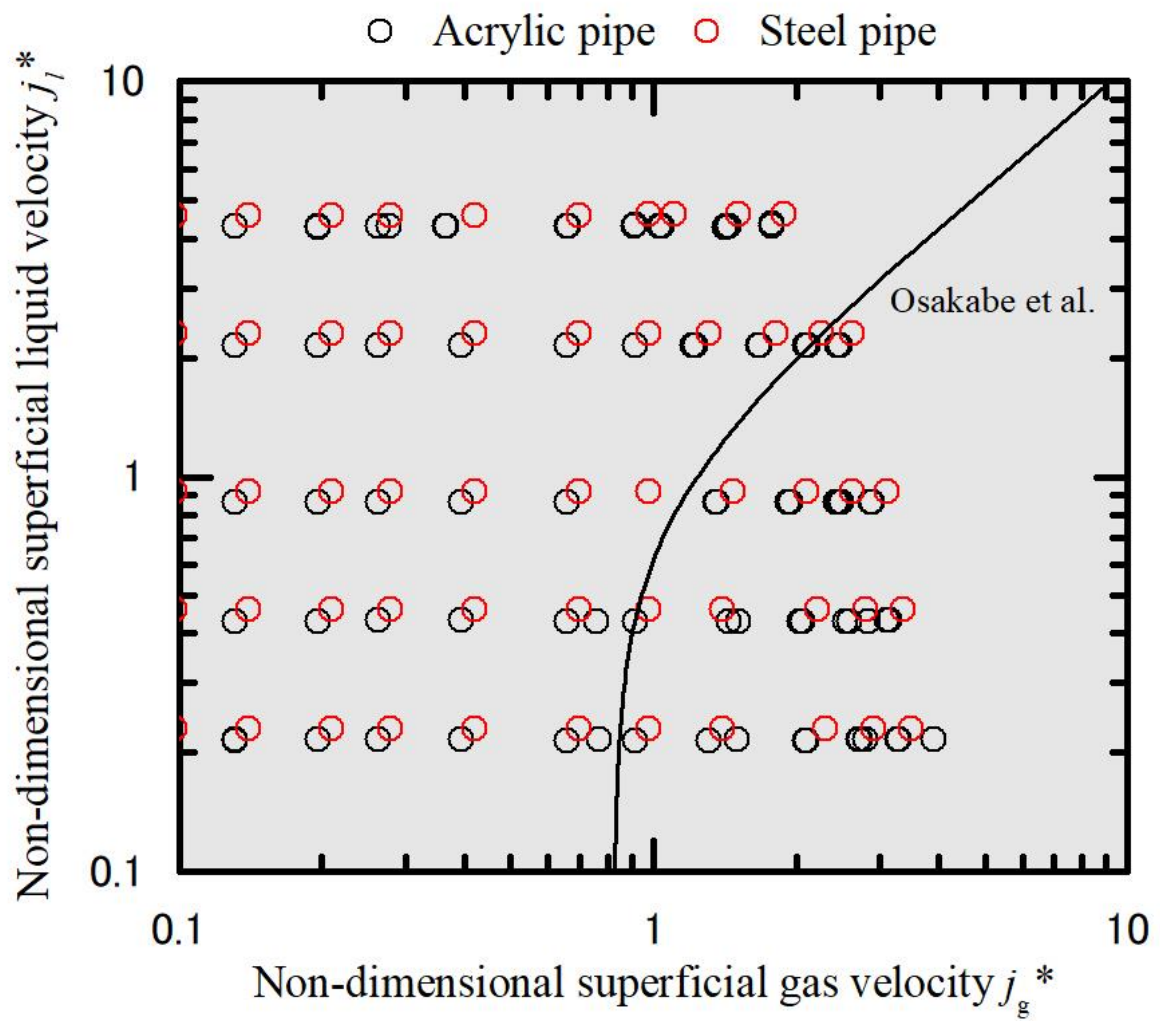


図 3.88 本実験範囲と環状流遷移式との関係

4. 結論

流動音の解析により流動様式ごとの特徴を探るため、内径 12mm のアクリル管、内径 11.7mm の鋼管内に様々な流量の気液二相流を垂直上昇流として流す本実験により以下の知見を得た。

- (1) アクリル管、鋼管共に水流量一定条件下において空気流量を増やしていった場合、チャーン流および環状流で実効値音圧の増減傾向に変化が現れた。
- (2) アクリル管では、フーリエ変換を使った解析により流動音の周波数成分を比較したところ、低周波数側（1kHz～9kHz）、高周波数側（14kHz～20kHz）のスペクトルに特徴が見られ、鋼管では、低周波数側（1kHz～7kHz）にアクリルと同様の傾向がみられたが、高周波数側では 18000Hz に小さなピークを持つのみだった。
- (3) 鋼管とアクリル管での周波数成分を比較した結果、鋼管では低周波数側の音圧は同等程度であったが、高周波数側では激しい音圧の減衰が見られた。これは密度差によって管壁による透過損失が異なったためだと考えられる。
- (4) 変動音解析を用いた結果では、アクリル管、鋼管共に水流量が少ない範囲において、変動周波数 1～5Hz と 6～30Hz に変動の違いが現れ、これらによって気泡流からスラグ流、チャーン流から環状流への遷移が判別できた。
- (5) 水流量が大きい領域では、変動音の傾向が変化した。この結果について、可視化実験より各流動様式の液膜中に微小気泡が含まれる事がわかった。
- (6) 変動音解析による環状流遷移については、刑部らの環状流遷移式を用いて検討したところ、環状流遷移の過程が異なっているために起きたと推測される。

謝辞

本論文の作成にあたり，適宜疑問に対して適切な助言を賜り，終始暖かいご指導をして下さいましたターボ動力研究室の刑部真弘教授，同研究室堀木幸代教授に対して心より御礼申し上げますまた本論文の副査を担当していただきました内燃機関工学研究室の塚本達郎教授に対して深く感謝申し上げます。

実験装置の設計や製作，また実験を行う際にはいつも同研究室の伊東次衛先生ご協力いただきました。誠に有難うございました。

実験や解析を行う際や発表に対する質問など，同研究室の学生諸氏には本研究を進める上で様々な形で助力をしていただきました。

これらの方々に心から御礼を申し上げ，本論文の謝辞とさせていただきます

参考文献

- [1] 日本混相流学会（編）（2004）『混相流ハンドブック』 朝倉書店
- [2] 赤川浩爾（1988）「気液二相流研究史と関連技術」,『混相流』, 2（1）, p.37-50
- [3] O.Baker. Design of pipe for simultaneous flow of oil and gas. Oil & Gas Journal, Vol.26（1964）
- [4] Bennett, A.W., Hewitt, G.F., Kearsey, H.A. Keeys, R.K.F. and Lacey, P.M.C., “Flow visualization studies of Boiling at High Pressure”, Proc. Inst. Mech. Eng., 180, (Part 3c), pp. 260-283, (1965). Conference Proceedings
- [5] 日本機械学会（編）（1989）『気液二相流技術ハンドブック』 コロナ社
- [6] 世古口ら, 他 4 名 :垂直気液二相流における液体塊の挙動パターン機論 B, 53-493, 2807-2813 (昭 62-9)
- [7] 刑部正弘（2004）『エネルギー技術者の熱流体トレーニング』 海文堂
- [8] 平原達也, 蘆原郁, 小澤賢司, 宮坂榮一（2013）『音と人間』 コロナ社
- [9] 植田辰洋（1989）『気液二相流-流れと熱伝達-』 養賢堂
- [10] 小野測器技術レポート https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/fluct_sound/index.htm （2019 年 2 月）